

С.Миттон

Дневная звезда

Москва „Мир“



Daytime Star

The Story of Our Sun

SIMON MITTON

Faber and Faber

London/Boston

С.Миттон

Дневная звезда

Рассказ о нашем Солнце

Перевод с английского
Б. А. ИОШПЫ и Е. В. ИВАНОВА

Москва «Мир» 1984

ББК 22.652

М 67

УДК 526

Миттон С.

М 67 Дневная звезда. Рассказ о нашем Солнце: Пер. с
англ. — М.: Мир, 1984. — 208 с., ил.

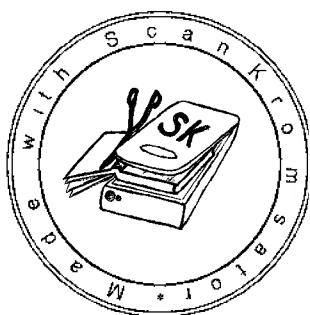
Новая книга известного английского астронома и популяризатора, уже знакомого читателям по книге «Галактики», выпущенной в 1979 г., посвящена «дневной звезде» — Солнцу, источнику тепла и жизни на Земле. Автор увлекательно рассказывает о том, что нового мы узнали за годы космической эры о Солнце и солнечно-земных связях.

Книга хорошо иллюстрирована и рассчитана на широкие круги читателей.

М $\frac{1705050000-308}{041(01)-84}$ 88—84, ч. 1

ББК 22.652
526

*Редакция литературы по космическим исследованиям,
астрономии и геофизике*



© Simon Mitton 1981

© Перевод на русский язык «Мир», 1984

Предисловие к русскому изданию

Перед нами — не совсем обычная научно-популярная книга о Солнце. Автор ее, английский астроном и популяризатор Саймон Миттон, уже знакомый советским читателям по переводу его книги «Галактики» (М.: Мир, 1979), поставил перед собой задачу в общедоступной форме рассказать о месте нашего Солнца в ряду других звезд, развитии наших представлений о строении Солнца и о современных методах его изучения. Необычность же его книги проявляется по меньшей мере в двух аспектах. Прежде всего, автор рассматривает изучение Солнца как задачу не только астрономии, но и науки вообще. Недаром книга начинается историческим очерком, в котором большое внимание уделяется многочисленным памятникам древней астрономии, среди которых наиболее впечатляющими, несомненно, являются знаменитый Стоунхендж в Англии, культовые сооружения в Египте и в государствах инков и майя. Ведь по существу эти своеобразные астрономические обсерватории обеспечивали наших далеких предков возможностями решения астрономических задач, уточнения характерных дат лунно-солнечного календаря и предсказания затмений. Точность, с которой строители должны были знать некоторые астрономические постоянные, поражает до сих пор, и автор не случайно пишет, что с учетом технических возможностей того времени создание Стоунхенджа потребовало от человечества не меньше усилий, чем вся современная программа космических полетов.

Далее, автор стремится везде довести рассказ об исследованиях Солнца до «сегодняшнего дня»; естественно, что небольшой объем научно-популярной книги нередко вынуждает его ограничиваться кратким изложением методики наблюдений и полученных результатов, без разъяснения физической сущности и подробностей решения тех или иных проблем. И все же читатель сможет познакомиться с такими сведениями с «переднего края» науки о Солнце, как загадка солнечных нейтрино, колебания атмосферы Солнца, выявление в исторические времена вариаций уровня излучения и активности Солнца, тесно связанных, как мы теперь догадываемся, с изменением погодных условий и климата.

Несколько особняком стоит последняя глава книги, посвященная будущему земной энергетики в связи с перспективами развития солнечной энергетики. Автор считает преувеличенными представления об опасности широкого использования ядерной энергии и выражает мнение, что будущее принадлежит атомным и солнечным энергетическим установкам.

Возможно, что автор чересчур оптимистично оценивает возможности крупномасштабной солнечной энергетики, но он безусловно прав, рисуя самую широкую перспективу развития малой солнечной энергетики, столь заманчивую для условий нашего юга и особенно Средней Азии. Здесь есть где приложить руки умельцам, в том числе юным техникам.

При чтении книги следует иметь в виду, что автор опирался в основном на материал исследований западных астрономов, прежде всего английских и американских. Читателям, желающим подробнее ознакомиться с работами советских астрономов, мы рекомендуем обратиться к следующей литературе (поскольку перечень книг, приведенных автором, включает только книги на английском языке):

По звездной эволюции и общим проблемам астрономии:
Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. Изд. 4-е.— М.: Наука, 1976;

Шкловский И. С. Звезды, их рождение, жизнь и смерть.— М.: Наука, 1975;

По вопросам солнечной активности:

Мирошниченко Л. И. Солнечная активность и Земля. М.: Наука, 1981;

Кононович Э. В. Солнце — дневная звезда. М.: Просвещение, 1982;

Солнечные вспышки/Отв. редактор В. Е. Степанов.— М.: Наука, 1982;

По космическим исследованиям, в том числе исследованиям Солнца:

Гольдовский Д. Ю., Назаров Г. А. 25 лет космической эры: из истории создания первых ИСЗ.— М.: Знание, 1982;

по проблемам использования солнечной энергии:

Колтун М. Солнце и человечество. М.: Детская литература, 1981;

по проблемам солнечно-земных связей и влияния Солнца на Землю:

Витинский Ю. И., Оль А. И., Сазонов Б. И. Солнце и атмосфера Земли./Под ред. Э. Р. Мустеля.— Л.: Гидрометеиздат, 1976.

Наконец, более подготовленному читателю можно рекомендовать книги:

Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов.— М.: Мир, 1980;

Гибсон Э. Спокойное Солнце,— М.: Мир, 1977;

Солнечно-земные связи, погода и климат. М.: Мир, 1982.

Изучение Солнца сейчас движется вперед быстро — сам автор отмечает, что сейчас каждый пятый астроном в мире занимается Солнцем. Поэтому хотелось бы сделать несколько дополнений к тому, о чем пишет автор.

Так, в главе 8 он описывает открытие собственных колебаний солнечной атмосферы. Большой вклад в эти исследования внесли также советские ученые во главе с акад. А. Б. Северным, обнаружившие колебания Солнца с периодом 2 час 40 мин, что было впоследствии подтверждено другими исследователями. Ряд статей об этом опубликован в трудах Крымской астрофизической обсерватории. В той же главе в качестве основного источника нагрева верхних слоев атмосферы Солнца называется диссипация звуковых (акустических) волн, зарождающихся ниже уровня фотосферы. В настоящее время все большее внимание привлекает точка зрения, что основную роль в нагреве атмосферы Солнца играет омическая диссипация. Наконец, следует напомнить, что в открытии радиационных поясов Земли большую роль сыграли работы акад. С. Н. Вернова и его сотрудников, проведенные на первых в истории советских искусственных спутниках Земли.

И в заключение — кому предназначена эта книга? По уровню изложения она вполне доступна школьникам старших классов и прежде всего лицам, интересующимся астрономией, в том числе историей и ролью «дневной звезды» — нашего Солнца.

Введение и гл. 1—8 переведены Б. А. Иошпой, гл. 9—11 и указатель — Е. В. Ивановым.

*Б. А. Иошпа
Е. В. Иванов*

Предупреждение!

В этой книге рассказывается о Солнце. Ни при каких обстоятельствах никто не должен пытаться смотреть прямо на Солнце, даже через светофильтры или закопченные стекла. Солнце --- мощный источник инфракрасного и ультрафиолетового излучения; если оно окажется сконцентрированным на сетчатке глаза, это может привести к непоправимым последствиям для зрения.

В гл. 3 описан безопасный метод наблюдений Солнца путем проектирования его изображения на экран из белого картона.

Введение

Среди миллиардов звезд Млечного Пути Солнце — звезда, ничем особенным не выделяющаяся. Когда мы задумываемся о непостижимой разуму огромности космоса с бесчисленными скоплениями галактик, разбросанных по пространству, мы поражаемся незначительности нашей планеты, нашего Солнца, даже нашей Галактики перед молчаливыми просторами Вселенной. Гигантский диск нашей Галактики кажется нам светлой пеленой, наброшенной на небо. В действительности это плоский заполненный звездами диск, из центра которого выходят два спиральных рукава. Наше Солнце расположено далеко от центра Галактики вдоль одного из таких рукавов. 32 000 световых лет отделяют Солнце от центра Млечного Пути. В Галактике миллиарды звезд, подобных Солнцу, поскольку у него типичные для большинства звезд размер, масса, структура, температура и светимость. Единственная причина особого интереса, который астрономы проявляют к Солнцу, очень проста — мы обращаемся вокруг этой звезды и поэтому можем изучать ее подробнее, чем другие звезды. Нет другой звезды, настолько близкой к нам, чтобы мы могли исследовать тонкую структуру ее поверхности. Ни о какой другой звезде мы не можем с определенностью утверждать, что у нее есть несколько планет, хотя с теоретической точки зрения это вполне вероятно. Неверно, что все астрономы наблюдают темное звездное небо. На самом деле примерно каждый пятый астроном посвятил себя изучению Солнца.

Современная наука о Солнце включает в себя, кроме традиционной астрономии, еще много других научных дисциплин. Солнечная энергия является основным источником всех естественных явлений на Земле: она нагревает ее атмосферу, океаны и поверхность суши. Она должно быть влияет каким-то образом на климатические изменения, такие как засухи, ледниковые периоды и т. д. Частицы, извергаемые Солнцем в периоды бурного выделения энергии, например во время солнечных вспышек, вызывают на Земле полярные сияния, изучаемые исследователями атмосферы. Внутренние слои Солнца представляют собой уникальную лабораторию для физиков. Там такие температуры, давления и плотности, каких никогда не получить на Земле. Благодаря Солнцу мы можем изучать взаимодействия горячей плазмы с магнитными полями. Именно Солнцу мы обязаны тем, что знаем, какие процессы приводят к освобождению ядерной энергии внутри звезд. Солнце также владеет секретами химического состава Вселенной. Оно сконденсировалось из космического газового облака. Мы можем выяснить этот первичный химиче-

ский состав, изучая содержание элементов на Солнце в настоящее время.

Физика Солнца представляет собой важную отрасль астрономии. В шестидесятые и семидесятые годы она была отодвинута на второй план в результате целого ряда открытий экзотических объектов, сделанных радио- и рентгеновской астрономией. Радиогалактики, квазары, пульсары, нейтронные звезды и черные дыры — все эти названия входили в обиходную речь по мере того, как ученые открывали явления, которые, казалось, находились в противоречии с установленными теориями. Все это время на солнечных обсерваториях спокойно продолжалась обычная работа. Но 14 мая 1973 г. из Флориды был запущен «Скайлэб». Эта орбитальная станция, предназначенная для солнечных исследований, произвела переворот в современной физике Солнца. Полученные результаты еще долгие годы будут внимательно изучаться. На станции были расположены шесть телескопов, детально исследовавших Солнце в широком спектральном интервале, включающем рентген и ультрафиолет, не пропускаемые нашей атмосферой. Станция с экипажем на борту функционировала 171 день. Все ее исследовательские задачи были успешно выполнены, даже перевыполнены.

В эти же годы резко повысился интерес к проблеме источников энергии на Земле. Не существует дефицита энергии как таковой, есть просто дефицит дешевой и легко доступной энергии. Солнце обладает огромными запасами тепловой энергии, причем бесплатной и не вызывающей побочных эффектов, связанных со сгоранием ископаемого топлива или радиационной опасностью при использовании ядерной энергии. Любая разумная энергетическая политика дальнего прицела должна опираться на все большее использование солнечной энергии. Это сейчас общепризнано и служит усилению интереса к солнечным исследованиям.

В этой книге я сделал попытку рассказать в общих чертах о нашем сегодняшнем понимании Солнца. Это очень увлекательная повесть, включающая историю, физику, астрофизику, космические исследования и энергетические проблемы. Объединяющей темой является рассказ о том, как с точки зрения физики можно объяснить большинство наблюдаемых явлений. В то же время я подчеркиваю, что наблюдения Солнца оказали неоценимую услугу физической теории на определенных стадиях ее развития.

Читатели, желающие продолжить знакомство с миром Солнца, могут найти в краткой библиографии, приводимой в конце книги, отправную точку для изучения обширной литературы по Солнцу.

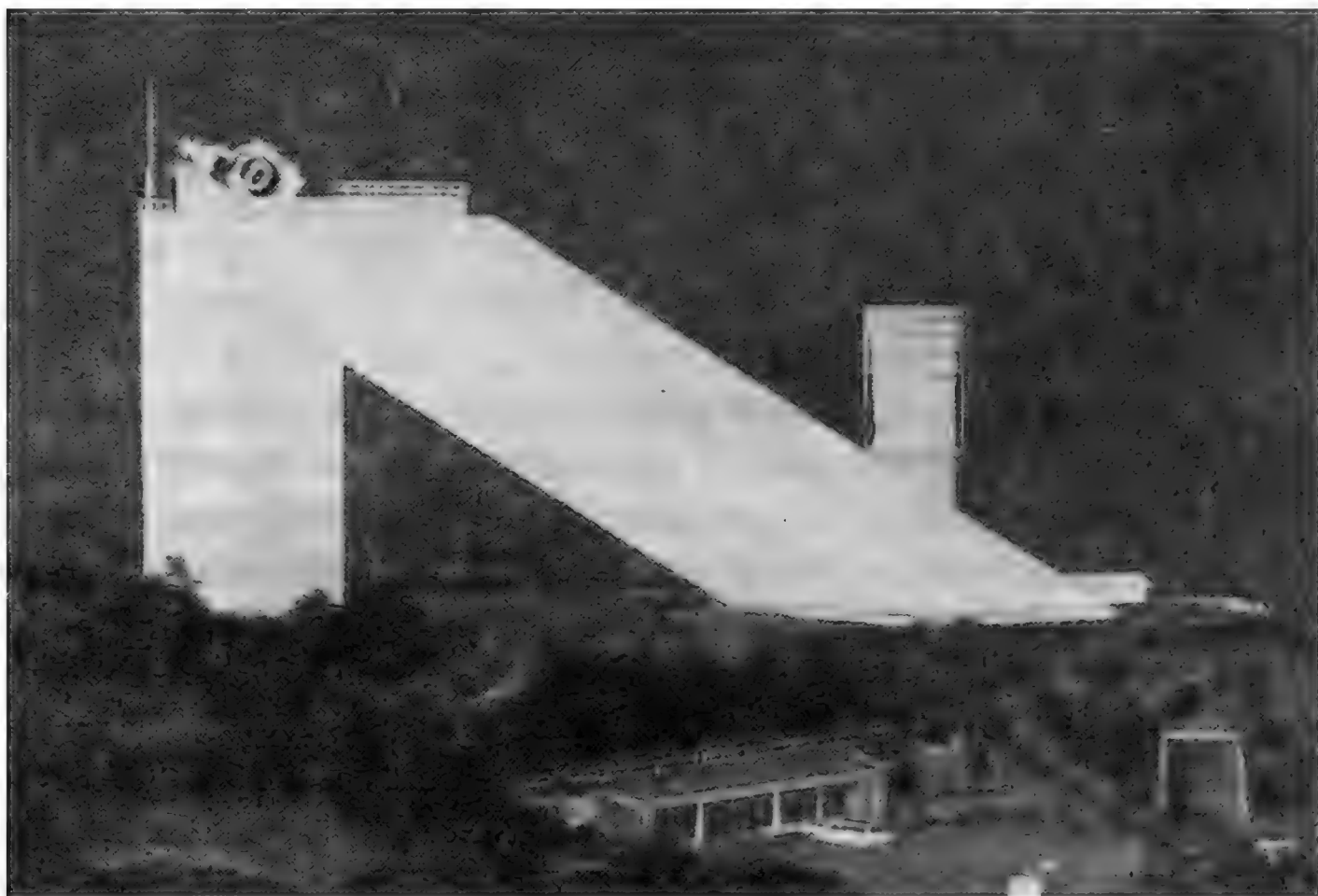
1

Древнее Солнце

В древние времена люди обожествляли Солнце как почти единственный источник тепла и света. Даже теперь эта традиция продолжает существовать среди некоторых примитивных племен, сохранившихся почти незатронутыми современной цивилизацией в пустыне и джунглях. Если взглянуть в глубь тысячелетий, на память приходят таинственные древние сооружения, сохранившиеся до наших дней — великие египетские пирамиды, одинокие каменные круги эпохи мегалита в Западной Европе, остатки цивилизации майя. Почему наши предки тратили столько усилий на воздвижение этих монументов? Мы не знаем точного ответа, однако потребность следить за движением Солнца была несомненно одним из главных стимулов в их строительстве.

Современные двойники этих старинных храмов — солнечные обсерватории. Наше Солнце поддерживает жизнь на планете. Оно влияет на климат и представляет серьезную опасность для людей, работающих в космосе. Поэтому Солнце находится под постоянным наблюдением астрономов. Они хотят узнать как можно больше о его деятельности и о том, как Солнце влияет на нас и на окружающую среду. Для этого ученые сооружают специальные обсерватории в местах с наибольшим количеством ясных дней. Используя сеть обсерваторий, ученые почти непрерывно могут исследовать магнитное поле и излучение Солнца.

Астрономы обнаружили, что возраст и размеры нашей Вселенной огромны. Она представляется человеческому разуму безграничной и вечной. Бесконечная Вселенная состоит из скоплений галактик, разбросанных в черной пустоте космоса, причем отдельные галактики, входящие в эти скопления, разделены миллионами световых лет. Наш Млечный Путь — это одна из таких галактик, видимая нами изнутри как скопление звездной пыли, рассыпанной по небосклону. Здесь, в непосредственном соседстве с нами, расположены сотни миллиардов звезд. Они образуют спиральную галактику, протяженность которой составляет сотни тысяч световых лет. В одном из спиральных рукавов этой галактики вдали от края Млечного Пути находится наше Солнце. Именно то, что оно *наше* Солнце, *наша* дневная звезда, и



Башня солнечного телескопа Мак-Мас Национальной обсерватории Китт-Пик в Аризоне (США) — одного из основных инструментов современного астронома-солнечника, желающего детально исследовать особенности нашего Солнца. (Национальная обсерватория Китт-Пик, Аризона.)

выделяет его для нас из бесконечного множества звезд. Оно ближе к нам, чем любая другая звезда, хотя пассажирскому самолету понадобилось бы 20 лет, чтобы достичь его, если бы такие путешествия были возможны. Излучение Солнца, нагревающее и освещающее Землю, проходит это кажущееся нам столь огромным расстояние за время, лишь немного превышающее восемь минут.

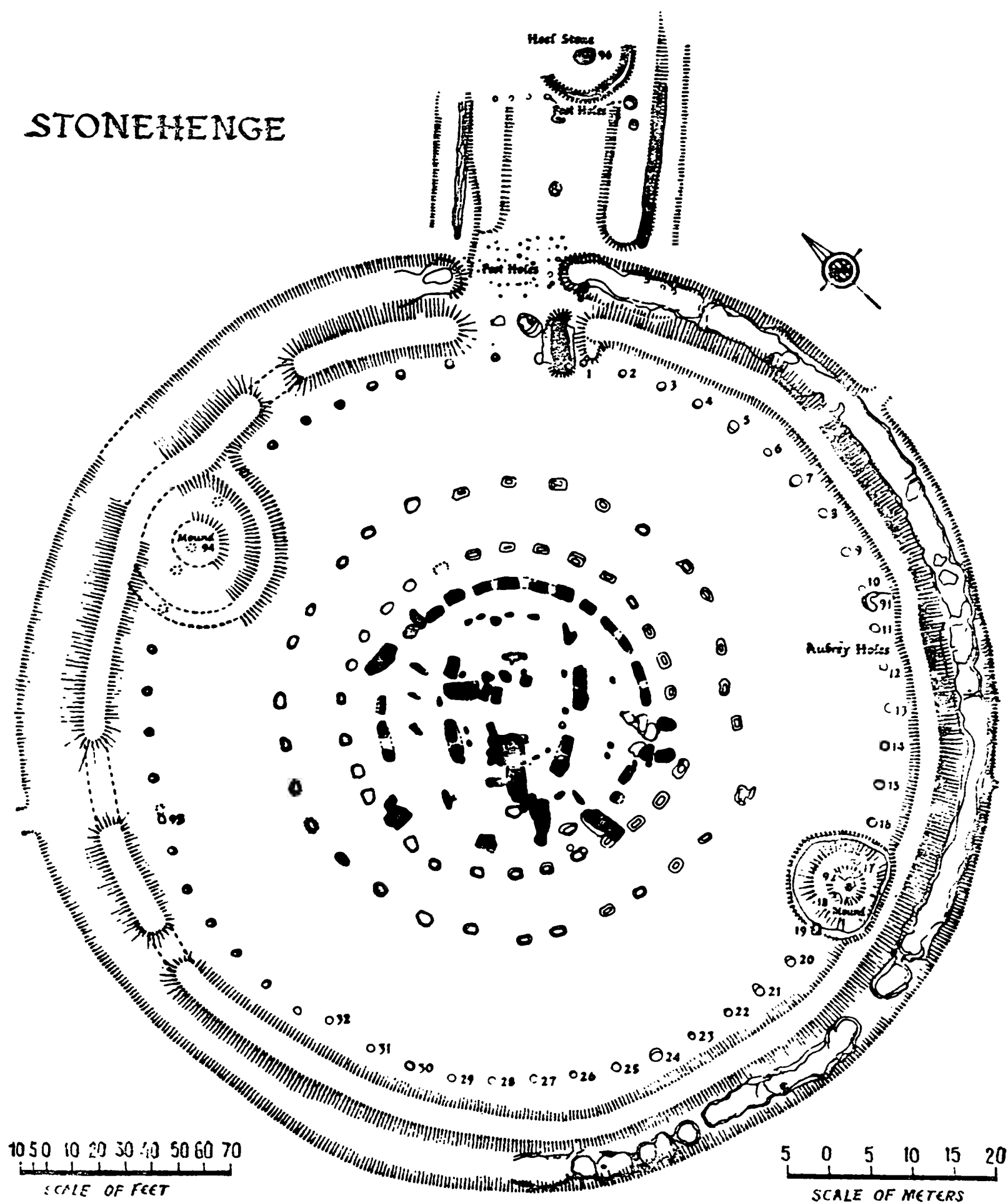
В этой книге я расскажу о Солнце с позиций современной астрономии. Осознание нами значения Солнца возросло в связи с внушающими опасения предсказаниями о том, что запасы нефти и угля на Земле истощатся в недалеком будущем. Единственное, рассчитанное на долгий срок решение этой неизбежной проблемы — возможность надежного и разумного использования ядерной и солнечной энергий. Наше будущее будет зависеть от успеха ученых в использовании огромной энергии солнечного излучения. Растущее осознание неисчерпаемости солнечной энергии привело к увеличению исследований в этой области и к драматическим открытиям, касающимся природы Солнца. Мы можем видеть Солнце сквозь широкое спектральное окно, на одном конце которого находится рентген, а на другом — радиоволны. Все это вызвало революцию в солнечных исследованиях. Но начнем наш рассказ об изучении Солнца с древних времен. Мы увидим,

что многое, сделанное тогда, по крайней мере так же впечатляет, как и современные достижения.

5 тысяч лет тому назад в Южной Англии в эпоху неолитической культуры начали серьезно заниматься астрономией. Предки неолитического человека перешли теперешний Ла-Манш по узкому перешейку земли, соединявшему тогда Британские острова с Европейским континентом. Около 10 000 лет до нашей эры волны разбушевавшегося Северного моря затопили перешеек и отрезали охотников среднего каменного века от континента. Постепенно произошел переход от общества охотников и собирателей трав к сельскохозяйственной общине. Около 3000 лет до нашей эры возникло неолитическое общество, начала развиваться технология, позволившая вырубать лес, очищать землю от кустарника, сеять и собирать пшеницу, передвигать огромные каменные глыбы. Развитие сельского хозяйства вело к более оседлому образу жизни, который побуждал к сотрудничеству и оставлял больше времени для размышлений.

Около 2600 лет до нашей эры (мы не можем назвать более точную дату) люди эпохи неолита в Южной Англии вырыли большой кольцевой ров на слегка холмистой равнине около города Солсбери. Ров имел форму правильного круга диаметром около 105 м. Выброшенные земля и булыжник образовали 2 вала по обе стороны рва. Около 3000 куб. метров дробленого мела нужно было выкопать при помощи кирок и скребков, сделанных из костей животных. И в самом деле, из плечевой лопатки быка может выйти неплохая лопата. Примерно 10 лет труда ушло на сооружение двух меловых валов. В северной части круга было оставлено место для входа. В 30 м перед входом за кольцом был установлен вертикальный камень, теперь называемый Пяточным. Длина этого знаменитого камня из песчаника — 6 м, а вес 35 т. Тем не менее он был перенесен на 32 км из известковых холмов Марлборо-Даунс, покрытых тогда крупными валунами, к месту теперешнего нахождения. По-видимому, для изобретательных строителей нового каменного века эта задача не представлялась чрезмерно трудной. Пяточный камень был установлен в меловой дыре вертикально, однако за последние 5 тыс. лет он наклонился на 30°.

Внутри кругового вала были сделаны две насыпи и четыре камня были установлены по углам прямоугольника. Затем было выкопано 56 лунок, разделяющих круг на 56 равных сегментов. Неплохо для неграмотных людей, занимающихся практической геометрией за 2000 лет до Эвклида, основателя геометрии как точной науки! Но для чего делали все это?



План Стоунхенджа, на котором показаны внешний вал и круг лунок, окружающих монументальное сооружение, воздвигнутое из огромных глыб. Пяточный камень (отмеченный номером 96) служил своеобразным визиром для фиксации положения Солнца в момент летнего солнцестояния. Четыре визира, отмеченные номерами 91, 92, 93 и 94, указывали на астрономически важные направления, отмечавшие восход и заход Солнца и особые положения Луны. 56 лунок Обри, первые 32 из которых пронумерованы на плане, представляли собой вычислительное устройство, помогающее определять наступление затмений. Подобное симметричное сооружение можно было воздвигнуть лишь на широте Стоунхенджа.

Изнутри круговые стены выглядели как ослепительно белое ограждение, замыкающее священное место, с его 56 лунками и точными прямоугольниками. Остальная часть Стоунхенджа — гигантские арки и мегалиты, которые поражают посетителей сегодня, были воздвигнуты лишь спустя 1000 лет.

В 1963 г. Джеральд Хокинс раскрыл тайну Стоунхенджа. В своем сенсационном докладе, опубликованном в научном еженедельнике *Nature*, он выдвинул по-настоящему смелую, однако спорную теорию, согласно которой Стоунхендж был сооружен как астрономическая лаборатория для наблюдений траекторий Солнца и Луны. Преследовались, по-видимому, 2 цели: упорядочение календаря для сельскохозяйственных нужд и предсказание солнечных затмений.

Чтобы пояснить вышесказанное (применимое и к другим древним каменным кругам), необходимо сначала описать движения Солнца и Луны, как они понимались строителями Стоунхенджа. Солнце восходит в разных точках горизонта в различные дни года. В северном полушарии в день летнего солнцестояния оно восходит в самой северной точке горизонта и в самой южной точке — в день зимнего солнцестояния. Это сразу дает способ проверки календаря. Тщательно, день за днем отмечая восходы Солнца, астрономы Стоунхенджа при помощи соответствующих отметок могли отождествить поворотные точки годового цикла. Две деревянные палки, находящиеся в 10 м друг от друга, могли играть роль визирных линий к горизонту. После нескольких лет практики можно было зафиксировать направления критических линий восхода и захода при помощи неподвижных столбиков и даже камешков. По-видимому, первые строители Стоунхенджа так и делали, поскольку наблюдатель в центре прямоугольника видит восход Солнца в день летнего солнцестояния прямо над вершиной Пяточного камня. Две стороны прямоугольника представляют собой те же самые визирные линии. Другие особенности геометрии Стоунхенджа производят еще большее впечатление. Если посмотреть в направлении, противоположном лучам восходящего летнего Солнца, то мы увидим точку на южном горизонте, где Солнце садится в дни зимнего солнцестояния.

Из всех естественных явлений на небе наибольшее впечатление производят затмения, которые возникают тогда, когда Солнце, Земля и Луна оказываются на одной прямой линии. Если Луна находится между Солнцем и Землей, наступает солнечное затмение, так как Луна загораживает от нас Солнце. Лунные затмения возникают, когда Земля находится между Солнцем и Луной, набрасывая тень на Луну. Полные лунные затмения довольно часты, так как Земля на-

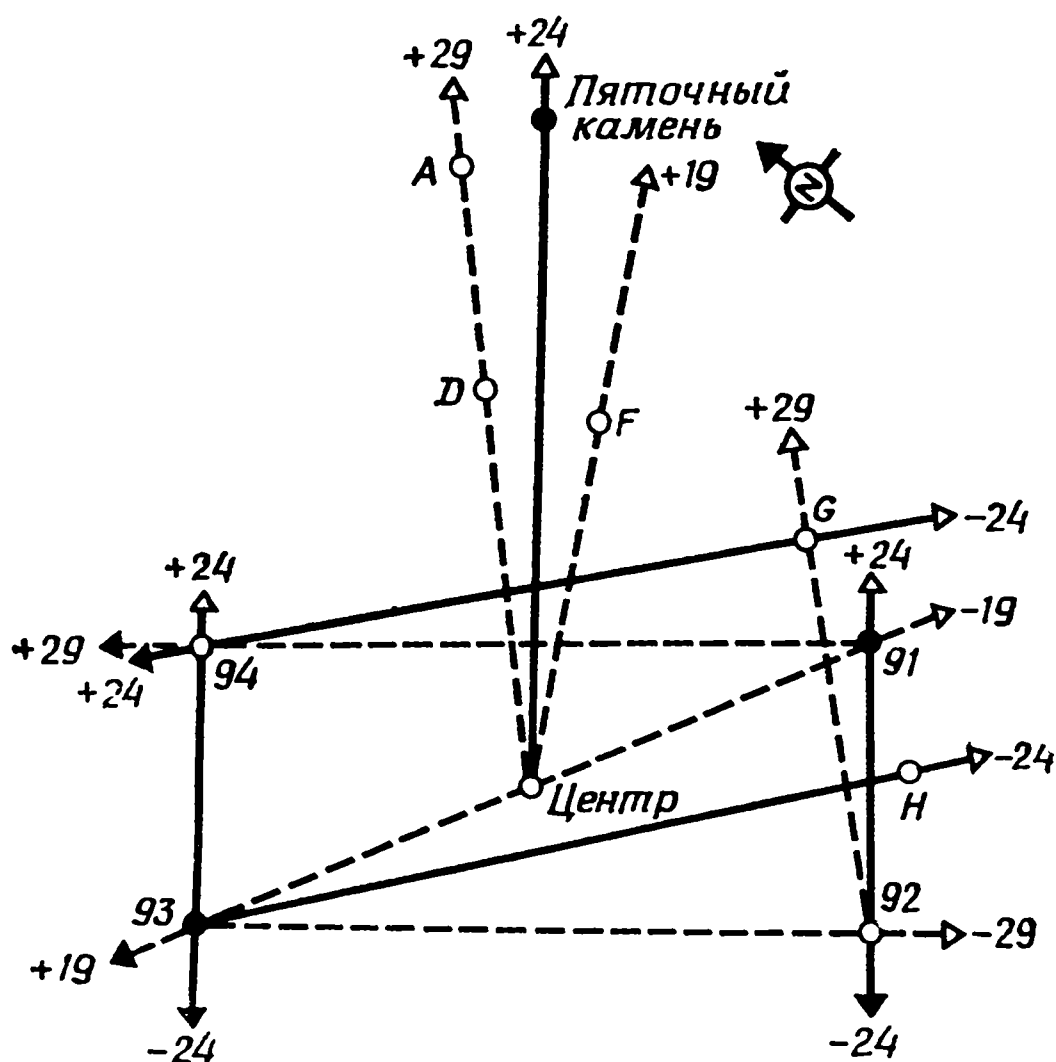
много больше Луны, и поэтому вероятность прохождения Луны через тень Земли относительно велика. В то же время полные солнечные затмения наблюдаются только в каком-то одном районе земного шара. Полное солнечное затмение гораздо более редкое явление, чем лунное. Большинство людей так никогда и не видят полного солнечного затмения.

Чтобы предсказать предстоящее затмение, необходимо тщательно отмечать движение Луны. Плоскость траектории Луны вокруг Земли отклоняется немного больше 5° от плоскости траектории годового движения Земли вокруг Солнца. Это приводит к тому, что относительное движение Луны по небу гораздо сложнее солнечного. Наклон плоскости лунной орбиты медленно меняется со временем и проходит полный цикл за 18,61 года. В результате экстремальные положения восхода и захода Луны, определяемые относительно горизонта, наблюдаются каждые 18,61 года.

В Стоунхендже длинные стороны прямоугольника направлены на самые южные точки восхода Луны и самые северные точки ее захода. Кроме того, одна диагональ одновременно определяет два важных промежуточных положения восхода и захода Луны. Одна из удивительных черт астрономических линий Стоунхенджа — их простая и в то же время замечательная симметрия. Всего одного прямоугольника достаточно для определения почти всех основных положений восхода и захода Солнца и Луны.

Разрушенные каменные монументы эпохи неолита можно найти по всей Западной Европе, а на Британских островах имеется множество маленьких каменных кругов. В большинстве случаев они вполне пригодны для календарных целей, особенно если мы учтем, что ошибка на неделю тогда не имела особого значения. Ведь для того, чтобы упорядочить календарь только для сельскохозяйственных нужд, можно ориентироваться и на миграцию птиц и на времена зимовки животных и цветения растений. Для чего же был сооружен Стоунхендж и почему его структура так сложна? Совершенно ясно, что на определение лунных линий не было бы затрачено столько усилий только с целью упорядочения календаря. Построение большого числа критических линий в прямоугольнике указывает на существование другой задачи. Если Стоунхендж передвинуть на другую широту, хотя бы только на 10 км на север или юг, он просто не будет действовать! Только на этой единственной широте линии Солнца и Луны могут быть определены при помощи прямоугольника. Что же кроется за этим хитроумным сооружением?

Хокинс и другие ученые, например известный космолог Фред Хойл, предположили, что этот уникальный прямоуголь-



Основные солнечные и лунные направления, зафиксированные камнями Стоунхенджа. Джералд Хокинс показал, что вероятность случайного совпадения этих направлений с астрономическими крайне мала. Похоже, что общий план Стоунхенджа возник из стремления достаточно точно проследить видимые движения Солнца и Луны, возможно с целью предсказывать наступление затмений.

ник использовался для определения дат затмений, видимых в Стоунхендже. Для этой цели необходимо намного более точное устройство, чем для простого повторяющегося календаря. Этой теорией можно также удовлетворительно объяснить существование 56 лунок, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга, которые несомненно должны были выполнять какую-то определенную полезную функцию.

Чтобы предсказать затмения, нужно было в совершенстве овладеть методом слежения за течением 18,61 годового цикла Луны. Если 18,61 умножить на 3, то получается почти точно число 56. Это дает повод думать, что лунки служили своего рода вычислительной машиной. Если маркировочный камень передвигать каждый год на 3 лунки, то он пройдет полный цикл так же, как и Луна, за 18,67 года. Это было одно из основных открытий Хокинса; он показал, как, найдя способ не сбиться со счета, можно было предсказать некоторые, хотя и не все, солнечные затмения в Стоунхендже.

Фред Хойл, работая над этой же проблемой, пришел к гениальному, хотя и довольно сложному, решению. Он показал, что, передвигая 4 маркировочных камня по определенной схеме и варьируя расстояния между лунками, можно

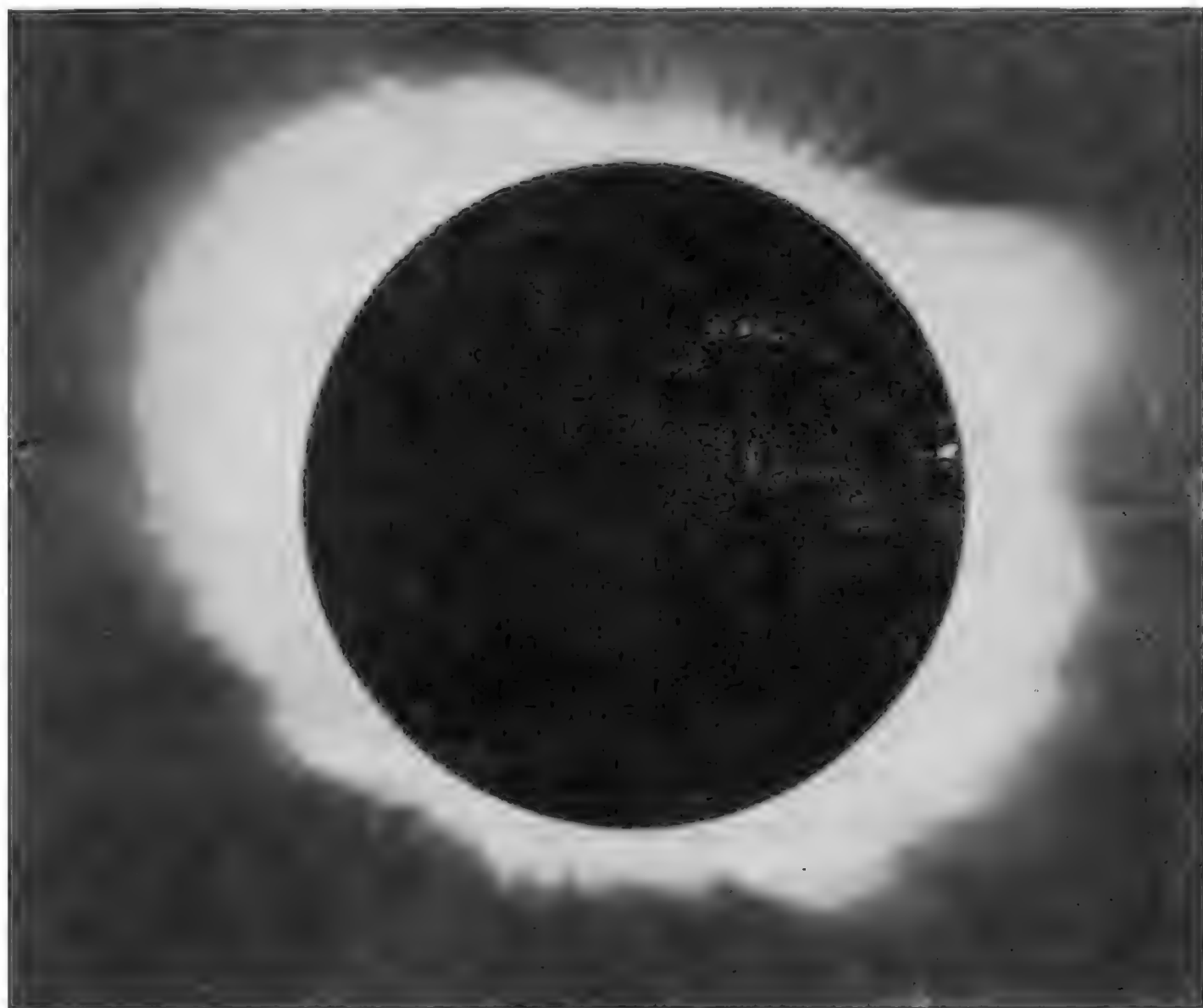
предсказать почти все затмения. Он указал на возможность коррекции неизбежно возникающих при пользовании схемой небольших ошибок; возможно, небольшие поправки производились в моменты, когда Солнце или Луна достигали своих критических положений при восходе и заходе. Теория Хойла предусматривает возможность использования Стоунхенджа даже сейчас в качестве надежного предсказателя затмений без внесения значительных изменений в древнюю схему. Конечно, мы не можем доказать, что все так и было в действительности, но и любой историк, работающий с письменными источниками, не может доказать, в том смысле, как это понимают ученые, реальность событий прошлого, за исключением самых элементарных. Доказано лишь, что современный человек может все еще предсказывать затмения, используя Стоунхендж.

Вообразите только, какой властью обладал предсказатель затмений! Солнце, свет Вселенной, самый могущественный из богов, исчезает при полном затмении. Очевидно, что тот, кто был способен предсказать такое исключительное событие, должен был обладать значительной политической и религиозной властью. И в тех редких случаях, когда священники предсказывали затмения, которые на самом деле не наблюдались, они могли объяснить это своим вмешательством в божественные дела.

Почти тысячу лет после первых строителей Стоунхенджа люди раннего бронзового века управляли Стоунхенджем. Эти преемники обладали секретами плавки металлов, добывали руду, занимались сельским хозяйством, торговали. Пышные захоронения свидетельствуют о прочности уклада, богатстве, предпринимательской деятельности правителей, торговавших с Шотландией, Египтом и Скандинавией. Люди раннего бронзового века также начали работу над постоянным храмом — свидетельством их астрономических знаний.

Беспорядочная каменная кладка, которую мы видим сейчас, была осуществлена нелегкой ценой. Например, ряды камней, так называемые голубые камни, которые в конце концов были расположены в форме круга и в форме подковы, привозились на лодках или плотах из Пресельских гор Уэльса. Более 80 камней, весивших 5 тонн каждый, перетаскивались вручную на санях и катках сначала вниз к естественной гавани у Милфорд-Хейвена, потом морем к устью реки Эйвон, а оттуда по суше до Стоунхенджа. Какая неудержимая сила влекла людей в Уэльс искать эти камни? Этого мы не знаем.

Совсем недалеко, в Марлборо-Даунсе, строители бронзового века нашли огромные серые глыбы, которые образуют



Полное затмение Солнца должно было производить потрясающее впечатление на древних людей. На этой превосходной фотографии, полученной И. Барнардом 28 мая 1900 г., хорошо выявляются силовые линии магнитного поля, исходящие из полюсов Солнца. (Королевское астрономическое общество, Лондон.)

арки и круг из гигантских колонн, или сарсенов. Каждый сарсен весит 25—50 тонн, а его длина достигает 5 м. Строители соорудили внешнее кольцо из 30 вертикально поставленных камней, покрытых сверху горизонтально уложенными плитами, чтобы получить полный круг связанных между собой арок. В центре сооружения были воздвигнуты 5 отдельных арок снова в виде подковы. Через большой центральный трилит или арку хорошо виден восход Солнца над Пяточным камнем в день летнего солнцестояния.

Некоторые приемы, необходимые для постройки Стоунхенджа, были продемонстрированы по телевидению. Вероятно, для того чтобы передвинуть один сарсен, требовалось несколько сотен людей, которые тянули его, волокли, устанавливали деревянные катки и расчищали дорогу. Лунки и рвы выкапывались при помощи оленьих рогов и бычьих лопаток. Чтобы уложить на место перекладины арок, требовались огромные насыпи из булыжника и земли. Многие камни обтесывались при помощи ударов больших молотов, а далее их поверхность отшлифовывалась путем протаскивания по ней

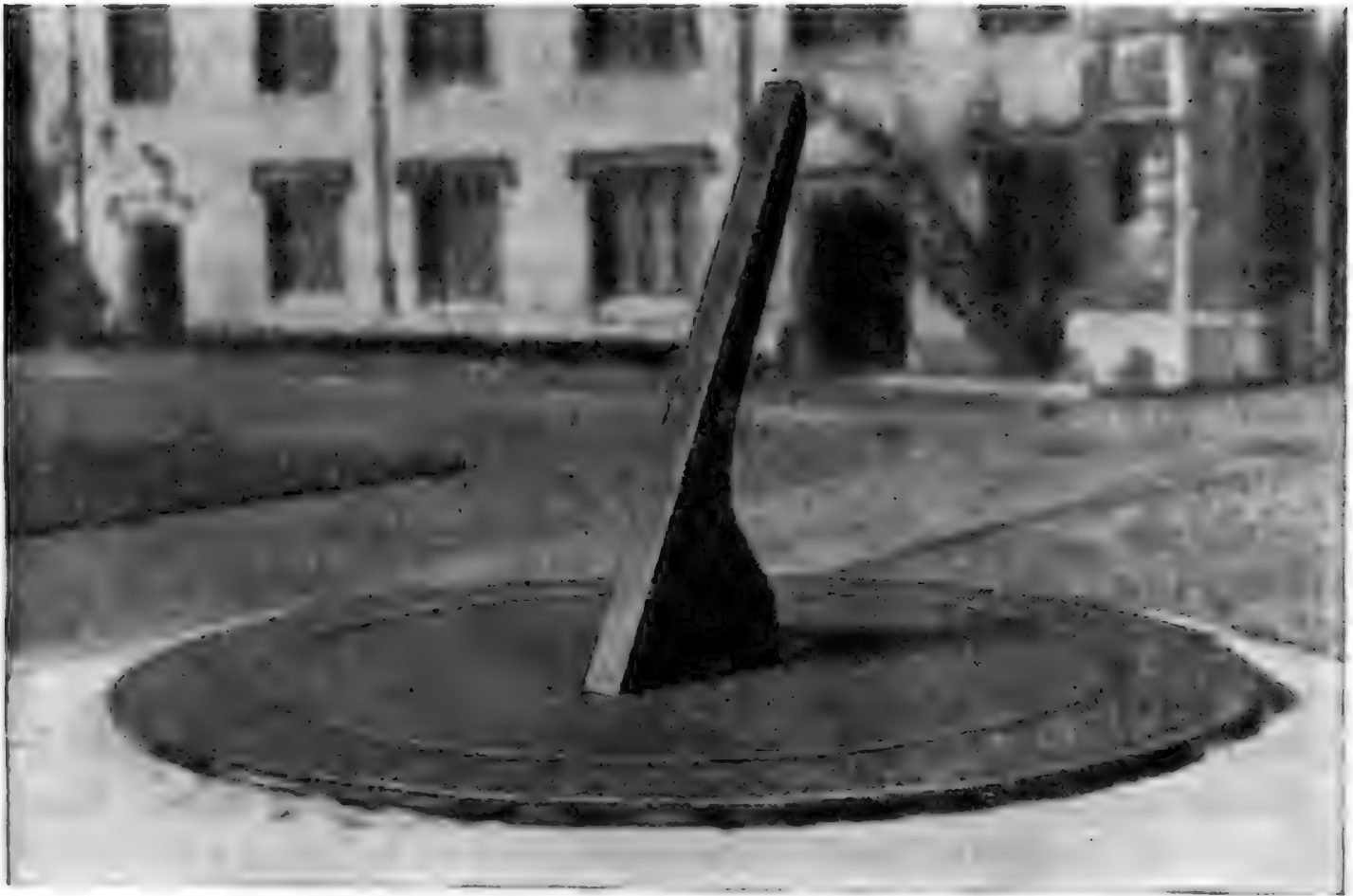
тяжелых камней. Около 60 тысяч человеко-дней ушло только на эту работу. А на всю работу по строительству Стоунхенджа должно было потребоваться около 1,5 млн. рабочих дней. Такая самоотверженность могла быть достигнута только при устойчивой общине, устремленной к общей цели.

И в результате Стоунхендж стал представлять собой самый изумительный научный прибор на свете — поражающую воображение обсерваторию для наблюдения за Солнцем и Луной. С точки зрения экономики, на его строительство ушло больше средств, чем на любую современную солнечную обсерваторию (относительно общих ресурсов общества). В этом отношении строительство Стоунхенджа можно сравнить только с программой космических исследований 1960-х годов.

Стоящие камни определяют направления множества узких лучей зрения к горизонту, большое число которых совпадает с направлениями восхода и захода Солнца в критические времена года. Но огромные каменные арки не очень точно фиксируют эти положения, так как центральные круги камней слишком близки друг к другу. Чтобы достаточно точно провести линию, нужны две точки, расположенные на расстоянии нескольких сотен шагов друг от друга. Тогда с какой же целью этот храм Солнца был воздвигнут, причем такой высокой ценой? Мы не знаем этого, но во всяком случае сооружение Стоунхенджа дало понять последующим поколениям, что древний человек угадал секрет солнечных затмений и достиг в этом гораздо большего, чем так часто превозносимые вавилоняне. Возможно, Стоунхендж играл роль центра, подобного национальным обсерваториям нашего времени, для координации работ меньших каменных кругов.

Другим указанием на раннее изучение Солнца в Европе могут служить традиции захоронений. В Нью-Гранж, Каунти-Мит (Ирландия), находится замечательная галерея могил. Это захоронение эпохи мегалита датируется 2500 годом до нашей эры. Оно окружено каменным кругом. Гробница установлена так, что в день зимнего солнцестояния первые лучи восходящего Солнца попадают в усыпальную камеру, находящуюся в конце гробницы. Этот критический момент является поворотным пунктом в солнечном цикле, когда слабеющее Солнце, лучи которого только в этот день согревают усыпальницу, перестает опускаться, начиная снова свое восхождение по небу.

Небесные боги преобладали в теологии древнего Египта. Небесная богиня Нат поддерживала небесный свод, Солнце совершало свой дневной путь в колеснице. Согласно египетской космологии 2000 года до нашей эры, ночью Солнце дви-



Современные солнечные часы — прямой потомок гигантских мегалитов каменного века. Солнечные часы всегда показывают местное время, которое отличается от стандартного времени (С. Миттон.)

гается под Землей с запада на восток. Среди египетских храмов наибольшее впечатление производит комплекс в Карнаке, расположенный в современном городе Луксоре. 15 больших храмов включают группу, посвященную богу Солнца Ра и богу Тебеса — древнего города, находившегося тогда на месте Луксора. Основные оси храма Амон-Ра направлены на точку восхода Солнца в самый короткий день года с точностью до 0,05 градусов. Другие храмы архитекторы посвятили Луне.

Важной особенностью египетских памятников являются сохранившиеся письменные свидетельства в виде иероглифов и настенных росписей. Они не оставляют никаких сомнений как в намерениях строителей, так и в достижениях астрономии того времени. В Амон-Ра археологи нашли надписи, посвященные восходу Солнца. Можно даже найти место, предназначенное для поклонения Солнцу, в этом месте сохранилась фреска, на которой изображен фараон, помогающий Амон-Ра и другим богам заложить основание храма. На фреске есть надпись: «Прими наше поклонение твоему прекрасному лику, владыка богов Амон-Ра, первородный бог двух царств». Это место мы назвали бы сейчас обсерваторией, т. е. местом для наблюдения за Солнцем, точнее, за его восходом во время зимнего солнцестояния.

Глыбы известняка общим весом в 6 млн. т вытянуты вдоль линии восхода Солнца в первый день весны. Стороны

пирамиды Гизе, датируемой 2800 г. до нашей эры, тянутся с востока на запад. Охраняющий пирамиды сфинкс пристально смотрит в пустыню, вглядываясь в розовую утреннюю зарю, улавливая первые лучи Солнца в день весеннего равноденствия.

Египет изобилует символами поклонения Солнцу и сооружениями для систематического наблюдения за ним. Амон-Ра, пирамида Гизе, сфинкс и великий храм Абу-Симбел, спасенный ЮНЕСКО от вод искусственного озера Насер, являются величайшими в мире памятниками, посвященными Солнцу. Дважды в год яркое восходящее Солнце, пересекая пустыню, проникает во внутреннее святилище храма Абу-Симбел, освещая статую фараона Рамзеса II, окруженную с двух сторон статуями бога Солнца.

Большая часть произведений искусства Египта рассеяна по музеям всего мира. В Центральном парке Нью-Йорка и на каменной набережной Лондона стоят обелиски-близнецы. Это так называемые Иглы Клеопатры, весят они 200 тонн, а высота их составляет 21 м. Вырезаны они из цельного гранита. Воздвигнутые в Гелиополисе (городе Солнца) тем же фараоном, который построил солнечную обсерваторию в Карнаке, они вначале были покрыты золотом. Возможно, они использовались как вертикальные теневые «столбы» («палки»), т. к. на их поверхностях есть надписи, посвященные богу Солнца Ра. Однако их точного назначения мы не знаем, поскольку Цезарь в 14 г. нашей эры передвинул их на другое место. Один обелиск привезли в Нью-Йорк в 1878 г., а другой оказался в Лондоне в 1880 г. Перевезенные в край, менее любимый Солнцем, они разрушаются очень быстро. Для спасения их следовало бы отвезти обратно в пустыню.

Если говорить о широте астрономических знаний, то вавилоняне превзошли египтян, хотя они уделяли основное внимание не Солнцу, а Луне. Месопотамия, теперешний Ирак, была колыбелью великой цивилизации, строившей укрепленные города уже 5000 лет тому назад. Там тоже были свои обсерватории — наблюдательные башни, называвшиеся зиккуратами. Вавилонская башня — один из самых известных примеров. Как уже было сказано, вавилонская астрономия ориентировалась на наблюдения Луны. Вавилоняне пользовались лунным календарем, а не солнечным, как мы. Писцы храмов вели подробные астрономические дневники. Они отмечали положения небесных тел при помощи клинообразных знаков на мягких глиняных табличках, которые потом обжигались. По счастливой случайности большинство из них сохранилось. Британский музей приобрел несколько

корзин таких табличек в конце XIX века, купив их у багдадских торговцев. Много табличек было спасено от строителей, которые хотели использовать эти замечательные «кирпичики» в современных постройках. Астрономические записи позволяли вавилонским священникам предсказывать поведение планет, Луны и Солнца. Они знали, что затмения возникают периодически; причем один из периодов составляет 135 месяцев, в течение которых существуют 23 интервала, когда вероятность наступления затмения особенно велика. Замечательный метонический цикл (названный в честь грека Метона из Афин, который позже изобрел календарь, основанный на этом цикле) длится 19 лет. Он также был известен в Вавилоне. Однако строители Стоунхенджа все-таки лучше разбирались в этой астрономической «игре».

На Американском континенте мы находим еще больше важных свидетельств поклонения Солнцу или, как мы это сейчас бы назвали, занятий солнечной астрономией древними народами. Мезоамериканская астрономия до Колумба и до испанских завоеваний процветала на фоне культуры, богатой прекрасными зданиями, искусством и золотом. Испанцы уничтожили местную американскую культуру главным образом из-за своего невежества и небывалой жадности. В результате мировая культура понесла одну из своих величайших потерь. Наши сведения об астрономии древних американцев в основном опираются на свидетельства, оставшиеся от цивилизации майя: резные каменные плиты и манускрипты, называемые кодексами. Майя жили в Юкатане на Гватемальской возвышенности и в западной части Гондураса и Эль-Сальвадора. Их цивилизация достигла своего расцвета в период 200—900 лет н. э., когда европейская мысль задыхалась под гнетом раннего средневековья, последовавшего за крушением Римской империи. После 900 г. н. э. джунгли и лес начали вторгаться в большие города, поэтому, когда в 1540 г. н. э. пришли испанцы, города были уже в состоянии сильного упадка.

В астрономии майя господствовали цифры, циклы и, самое главное, жгучее желание увековечить ход времени. Нигде мы не находим такой одержимости временем, как у майя, которые оставляли записи о его беге буквально повсюду: на лестницах, в коридорах, на плитах и стенах. Календарь майя был настолько развит и тщательно разработан, что он мог фиксировать даты событий за прошедшие сотни миллионов лет.

Знание затмений было превосходным. Это мы видим из так называемого Дрезденского кодекса, одной из нескольких прекрасных книг иероглифов, переживших испанское завоевание.

В Дрезденском кодексе имеется таблица, предсказывающая затмения. По этой таблице можно безошибочно рассчитать 1034 последовательных затмения, которые произошли на Земле в период между 206 и 647 годами н. э. С небольшими изменениями мы могли бы также использовать эту таблицу для предсказания всех затмений вплоть до XXV века, а может быть, и более поздних. Майя представляли время как координату, которая, выходя из бесконечности в прошлом, тянется вечно; вот почему их таблицы уходили так далеко в будущее.

В том же Дрезденском кодексе есть изображение солнечного божества — древнего бога с одним большим глазом. Ацтеки центральной Мексики обожествляли Солнце — Тонатию — молодого краснолицего бога. По преданию, он был сотворен в древней столице ацтеков Теотиуакане в горах. Чтобы умиловить бога, его надо было кормить сердцами храбрецов, что, вероятно, имело серьезные последствия, по крайней мере для некоторых жителей. Эти устрашающая жестокость и бесчеловечность, вызванные поклонением Солнцу, прекратились лишь тогда, когда Кортес уничтожил весь род ацтеков.

Майя, как и строители эпохи мегалита в Европе до них, наблюдали за движением бога-Солнца. Их двойная календарная система пользовалась двумя отдельными циклами в 260 и 365 дней. Поскольку Земля на самом деле совершает свой оборот вокруг Солнца за 365,25 дня, при использовании годового периода в 365 дней за столетие происходит смещение времени года на 25 дней, а за 1508 лет это смещение составляет полный год. Поэтому избранная группа астро священников следила за движением небесных тел для упорядочения календаря и приведения его в соответствие с временами года. При этом они не использовали високосных дней. В Яксактуне в Гватемале они соорудили Тройной храм на низком основании в точности к востоку от великой пирамиды майя. В трех критических точках восхода Солнца — в дни весеннего равноденствия, летнего и зимнего солнцестояния — солнечный диск поднимался над соответствующей крышей Тройного храма. В Чичен-Ица в Мексике, последнем великом городе майя, также существует обсерватория с 13-метровым куполом и с внутренней спиральной лестницей — нечто вроде обсерватории Маун-Паломер каменного века. Через три щели в цельной каменной кладке купола майя наблюдали заход Солнца и Луны в дни равноденствия.

Высоко в Перуанских Андах процветала культура инков. Инки, как и фараоны Египта, считали себя детьми Солнца. Поэтому поклонение Солнцу постоянно присутствовало в их

ритуальной и повседневной жизни. В период расцвета империя инков простиралась на 1000 миль от Кито в Эквадоре до Чили. Мачу Пикчу (Machu Picchu) — заброшенный город инков был расположен на зеленых холмах на высоте 2400 м над уровнем моря, на краю дождливого амазонского леса. На территории храма находился каменный гномон, или теневая палка, по которой отсчитывали время суток и определяли времена года. Центр Вселенной, по космологии ацтеков, лежал около озера Титикака — легендарного места рождения Солнца.

Тур Хейердал своим путешествием на деревянном плоту из Чили к островам Южного моря хотел продемонстрировать связь между культурами Полинезии и Анд. Мог ли Кон-Тики — бог Солнца инков — быть связанным с Тики, солнечным божеством Полинезии? Хотя Хейердал показал, что такое путешествие можно было совершить, одно это не доказывает существования непосредственной передачи идей между Андами и архипелагом Южного моря.

В Японии, стране Восходящего Солнца, в середине XX столетия утвердился синтоизм — религия, основанная на поклонении Солнцу. Вытекающая из религиозных традиций, уходящих в глубь тысячелетий, эта вера утверждала, что богиня-Солнце была основателем японского государства, а император происходит от Солнца и поэтому императорская династия будет править Японией вечно.

Очевидно, что с ранних времен поклонение Солнцу было широко распространено среди многочисленных народов и культур. В наше время эта одержимость принимает менее религиозную форму: берега Средиземного моря, Калифорния, Флорида и Сидней кишат жаждущими загореть поклонниками. Не так давно, когда большинство людей жило в деревнях, богатые слои общества умышленно избегали Солнца, заггар считался признаком деревенского жителя. Сейчас роли изменились, и коммерсант со своей призрачно-белой от сидения в конторе кожей тоскует по жгучим лучам и горячим пескам.

Возможно, хотя и нельзя утверждать определенно, уже 20 000 лет тому назад проводились систематические наблюдения Луны. Такой вывод можно сделать на основании меток и царапин на костях животных. Но несомненно к 3000 г. до н. э. знания о Луне и Солнце накопились независимо на американском континенте, на Ближнем Востоке и в Западной Европе. В Америке непрерывные наблюдения продолжались вплоть до испанского завоевания, а в Старом Свете они были прекращены гораздо раньше в результате новых переселений народов, появления новых философских и

религиозных течений. Как повезло нам, что строители эпохи мегалита соорудили прочные памятники, из которых мы можем так много узнать об их верованиях. Нам сейчас трудно понять то значение, которое придавали небу обитатели древнего мира. Но когда в следующий раз вас застанет солнечный восход где-нибудь в спокойном месте на природе, не торопитесь. Помню великолепные рассветы в Австралии. С горы Сайдинг Спринг я мог видеть простирающиеся на много миль пастбища Нового Южного Уэльса. Вот звезды исчезли с посветлевшего неба. Сверху небо светло-серое, а ниже — розовое. Наконец, как будто из-под земли, медленно и неумолимо восходит сверкающее, пугающе огромное кроваво-красное Солнце. Нарушая утреннюю тишину, воздух наполняется какофонией звуков. Пронзительно кричат восхитительные попугаи, и тень ночи быстро продвигается вниз по равнинам, а восход идет на запад — к великим центральным пустыням континента. Природа научила наших предков боготворить Солнце. Они были ближе к Земле и небу, чем мы, но в наших сердцах и сейчас мы восхваляем восходящее Солнце.

2

Наша ближайшая звезда

И сейчас есть много мест, где «поклоняются» Солнцу, например Майами, Бонди Биг, Коста дель Соль. Но многие ли из поклонников Солнца понимают, почему Солнце генерирует ультрафиолетовые лучи, от которых темнеет наша кожа? Несколько миллионов лет уходит на то, чтобы энергия, освобождающаяся в центре Солнца, достигла его золотой поверхности, и всего восемь минут на то, чтобы она дошла до Земли. Солнечный свет, которым мы сейчас наслаждаемся, «создан» задолго до появления *Homo Sapiens* как отчетливо выраженного вида. Кто будет на Земле наслаждаться выделяющейся сейчас в центре Солнца энергией, когда она через миллион лет покинет Солнце?

Наше Солнце — это одна из звезд. Но, поскольку Солнце — ближайшая к нам звезда, оно представляет особый интерес для астрономов. Земля удалена от Солнца в среднем на 150 млн. км. Другая ближайшая из известных нам звезд — Проксима Центавра, очень слабая и находится на расстоянии 4 световых лет или $40 \cdot 10^{12}$ км от Земли. Следовательно, Солнце в 250 раз ближе к нам самой близкой звезды. Чтобы сделать наглядным это различие, приведем следующий пример. Вы, вероятно, держите эту книгу на расстоянии 30 см от глаз. Пусть другая самая ближайшая книга находится на расстоянии в 75 км. Что мы можем увидеть! Даже через мощный телескоп можно различить лишь размер и цвет книги, но о содержании ее мы ничего не узнаем. Может быть, мы сможем прочесть название книги, и тогда будем знать, роман ли это, или путеводитель, или словарь. Астрономы находятся почти в таком же положении. Солнце может быть изучено довольно детально; что же касается звезд, мы узнаем лишь цвет, размеры, вид и приблизительный химический состав.

Итак, наше Солнце — самая важная для нас звезда на небе именно потому, что она ближайшая к нам. В конечном счете Солнце — источник всей энергии на Земле, за исключением той, что вырабатывается на атомных электростанциях или выделяется при радиоактивном распаде элементов. Поэтому мы все интересуемся Солнцем; ведь оно дает свет и тепло, необходимые для жизни растений и животных.

Примерно 100 лет тому назад в 1871 г. Ричард Проктор так назвал свою книгу по солнечной физике: «Солнце: Властелин, Огонь, Свет и Жизнь планетной системы».

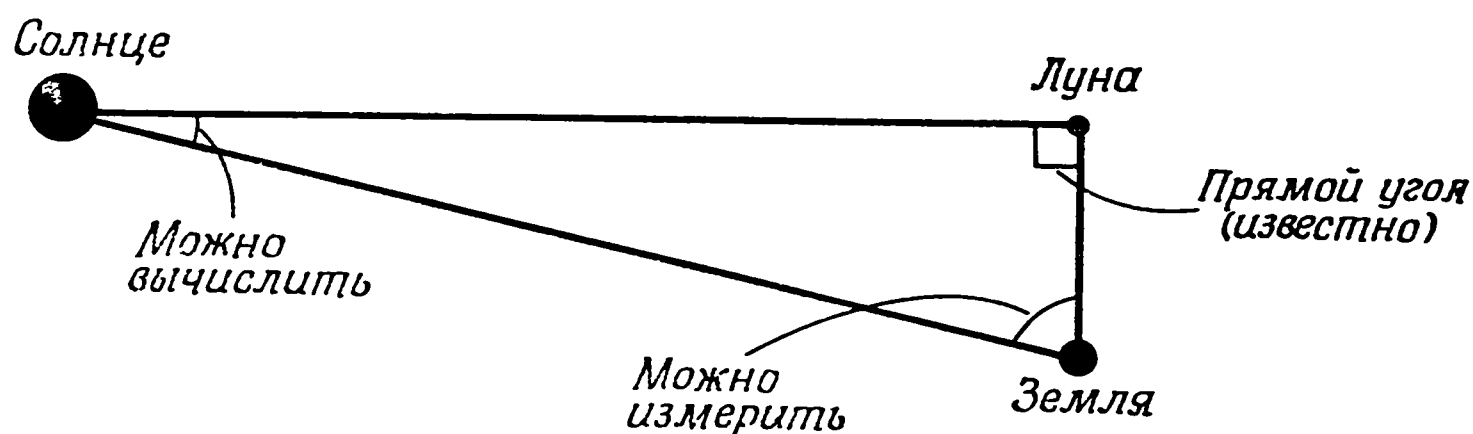
Однако интересы астрономов простираются гораздо дальше повседневной жизни: перед ними космическая лаборатория, в которой можно исследовать процессы, важные для Вселенной в целом. Солнце может рассказать нам о самой Вселенной, если мы раскроем тайны его рождения, жизни и неминуемой смерти. В настоящее время примерно пятая часть профессиональных астрономов всего мира, около 500 человек, заняты в основном солнечными исследованиями. Большое число любителей также специализируются в наблюдениях за Солнцем.

Звезды совсем не похожи на планеты. Звезда, подобная Солнцу,— это ярко светящийся шар горячего газа с огненным ядерным очагом. Звезды целиком состоят из газа, и поэтому их поверхность не имеет резких очертаний. А планеты состоят из горных пород или являются шарами холодного газа. Основной отличительной особенностью звезд является то, что они излучают энергию, когда-то захваченную ядрами атомов. У планет, наоборот, незначительные запасы внутренней энергии, и они в основном питаются энергией ближайших звезд. Звезда светит сама по себе, а планету мы можем увидеть при помощи оптических телескопов только потому, что она отражает солнечный свет. Мне кажется очень удивительным то, что законы физики требуют ядерных реакторов размером с Солнце для извлечения энергии из субмикроскопического мира протонов и нейтронов. Размеры солнечного реактора, необходимого для выделения огромной энергии атомных ядер, в 10^{22} больше размеров самих этих ядер.

Я уже упоминал, что Солнце находится на расстоянии около 150 миллионов километров от Земли. Для определения расстояния до Солнца надо было хорошо разбираться в геометрии. Из астрономов прошлого только греки смогли найти разумный подход к решению этой задачи, так как они прекрасно знали то, что мы сейчас называем евклидовой геометрией. Над входом в Афинскую академию было написано: «Кто не знает геометрии, пусть сюда не входит». Аристотель (384—322 гг. до н. э.) изучал труды Платона (427—317 гг. до н. э.) в Академии, основанной в 387 г. до н. э. Труды Аристотеля оказывали огромное влияние на солнечные исследования в течение почти 2000 лет. Один из последователей Платона, Евклид, живший в III веке до н. э., дал первое связанное изложение геометрии прямых линий и идеальных кругов. Он показал, как при помощи логических рассуждений полу-

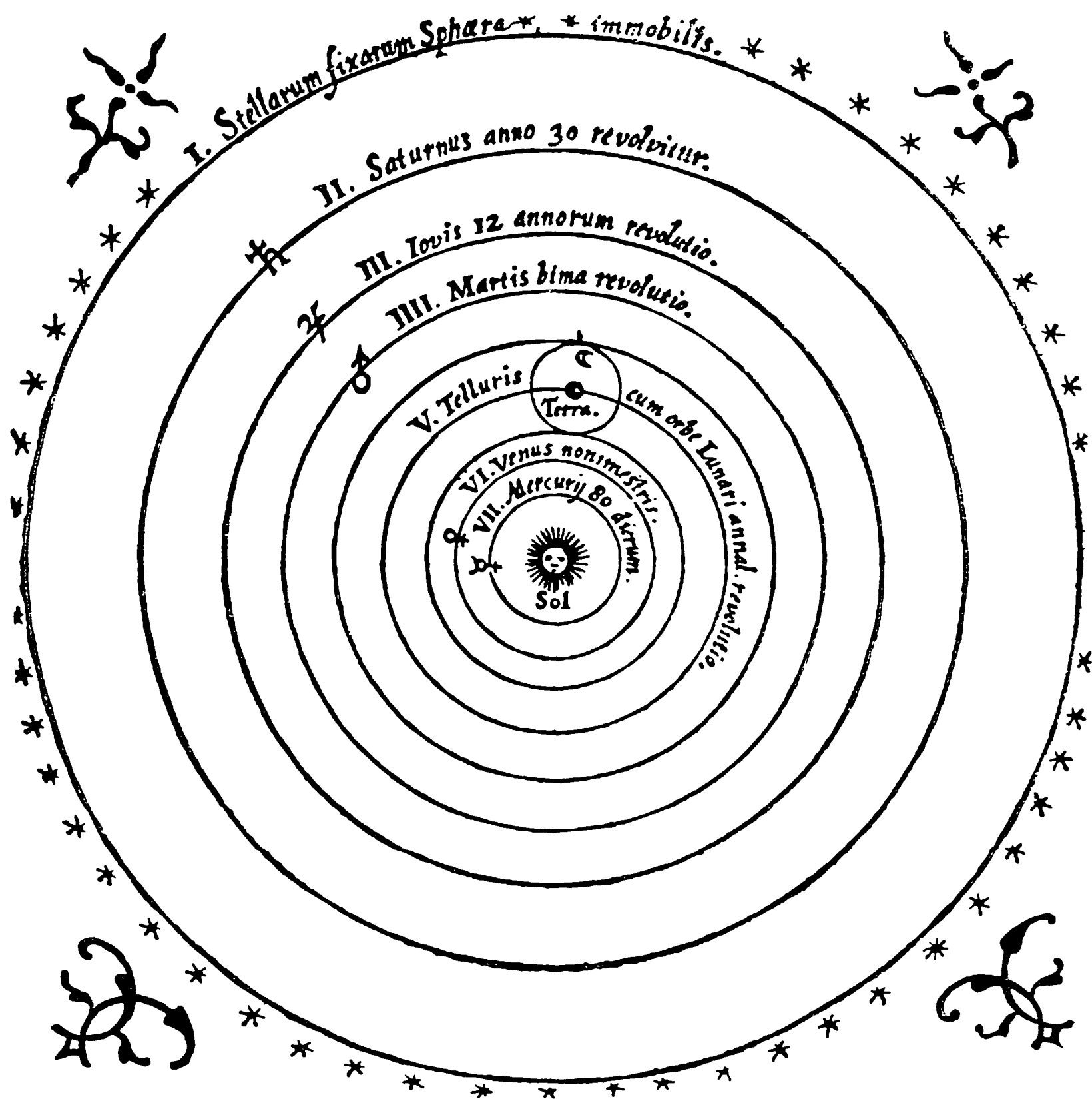
читать основные результаты на основании определенного набора аксиом.

Один из гигантов греческой астрономии Аристарх из Самоса (320—250 гг. до н. э.) сделал попытку использовать геометрию Эвклида для измерения расстояний, о которых до него имели весьма смутное представление. Так, например, Анаксагор (500—428 гг. до н. э.) учил, что Солнце представляет собой раскаленный камень диаметром 50 км. Метод Аристарха совершенно верен, но трудно применим на практике. Он доказал, что в тот момент, когда мы видим на небе точно половину Луны, угол между направлениями Солнце — Луна и Земля — Луна должен быть прямым. Тогда измерение угла между направлениями от Земли до Луны и до Солнца дает возможность определить все углы треугольника Солнце — Луна — Земля.



Так Аристарх представлял себе геометрию взаимного расположения Солнца, Луны и Земли в вершинах треугольника. Он понял, что, когда мы видим Луну в фазе четверти, угол треугольника с вершиной в Луне оказывается прямым, и измерение угла Солнце — Земля — Луна позволит определить относительные расстояния от Земли до Солнца и Луны.

Аристарх измерил этот важный угол (Солнце — Земля — Луна) и получил величину, равную 87° . На основании этого он сделал вывод, что Солнце примерно в 20 раз дальше от Земли, чем Луна, и находится на расстоянии 6 млн. км. Но прежде чем отнестись пренебрежительно к Аристарху из-за такой большой ошибки, вспомните, что он был первым астрономом, который понял, что Земля вращается вокруг Солнца и что Луна светит за счет отраженного солнечного света. По крайней мере Аристарх показал, что размеры солнечной системы огромны по сравнению с земными масштабами. Солнце дало возможность понять, что Вселенная гораздо больше Земли, что являлось для того времени значительным достижением. Трудность этого наблюдения — одного из немногих реальных наблюдений, проведенных греческими учеными, — состоит в необходимости точно предсказать время, когда Луна будет находиться в своей половинной фазе.



Знаменитая гелиоцентрическая схема строения Солнечной системы, опубликованная Николаем Коперником в 1543 г.

Расстояние очень сильно зависит от правильного нахождения угла, а так как угол в 87° , определенный Аристархом, далек от истинного значения, равного $89,85^\circ$, то его расчеты расстояния оказались совершенно неверными.

Прошло еще 2 тыс. лет, пока новый научный метод, возникший в XVI веке, начал использоваться для определения размеров солнечной системы. Все началось с Коперника (1473—1543), который в своей книге, опубликованной лишь в год его смерти, выдвинул смелые доводы в пользу того, что именно Солнце находится в центре солнечной системы и что оно не обращается вокруг Земли. В это время господствовало учение Аристотеля, ставшее преобладающим начиная с XIII века. Согласно философским воззрениям Аристо-

теля, Земля является центром Вселенной. Идеи Аристарха были преданы забвению. Вначале идеи Коперника снискали расположение католической церкви, они были признаны ошибочными только в 1616 г. Выводы Коперника стали составной частью идей, вызвавших интеллектуальное брожение, охватившее Европу в XVII веке.

Тихо Браге (1546—1601), первый наблюдатель в современном смысле этого слова, начал проводить систематические наблюдения за движениями планет в прекрасно оборудованной обсерватории, расположенной на побережье Швеции. Иоганн Кеплер (1571—1630) некоторое время работал помощником Тихо, а после смерти последнего унаследовал все накопленные его учителем данные наблюдений. Кеплер, мистик и астролог, провел фантастически огромную работу по анализу и интерпретации наблюдений Тихо. После двух десятилетий упорного труда он пришел к установлению ряда новых закономерностей. Он обнаружил, что планеты обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, нашел связь между размером орбиты и временем обращения планеты вокруг Солнца, определил характер изменения скорости движения планеты по ее траектории. Эта работа упрочила положение Солнца как неизменного владыки солнечной системы. Исаак Ньютон (1642—1727), блестящий английский математик, был тем человеком, который раскрыл причины такой поистине королевской власти Солнца.

Кеплер установил ряд законов. Ньютон показал, почему планеты, вращающиеся вокруг Солнца, подчиняются этим законам. Используя развитую им новую область математики, а именно дифференциальное исчисление, Ньютон объединил силы Земли и неба в единый замечательный синтез: он открыл закон всемирного тяготения. Хорошо известен рассказ о том, как падение яблока привело Ньютона к установлению этого закона. Он показал, что сила, которая притягивает падающий предмет к Земле, удерживает Луну на ее орбите вокруг Земли. Развивая эту идею, он смог показать, что планеты удерживаются на своих орбитах силой притяжения со стороны Солнца. Эллиптическая форма орбит совершенно естественно вытекает из теории Ньютона.

Законы движения, сформулированные Ньютоном, заново дали возможность рассчитать расстояние от Солнца до Земли. Даже сейчас, в конце XX века, непосредственно измерить это расстояние достаточно трудно. Поэтому вместо непосредственного измерения расстояния от Солнца до Земли измеряется в какой-то определенный момент расстояние от Земли до другого тела, обращающегося вокруг Солнца. Такое измерение может быть произведено сравнительно легко. На осно-

вании законов Ньютона можно рассчитать все остальные расстояния, принимая расстояние от Земли до Солнца за астрономическую единицу. Для перевода этих расстояний в километры надо было измерить в километрах расстояние хотя бы до одной планеты.

Сначала астрономы пытались измерить расстояние до Марса, так как он находится ближе всех других планет к Земле. Способ измерения заключается в определении видимого положения планеты на небе из разных точек Земли. Если смотреть на нашу соседнюю планету из различных обсерваторий, то из-за паралакса ее положения на небе не будут точно совпадать. Для определения расстояния от Марса до Земли достаточно знать расстояние между двумя обсерваториями и разность угловых положений Марса на небе по их измерениям. Угол направления на Марс телескопов, расположенных на противоположных сторонах земного шара, будет отличаться на $0,75''$. Первое применение этого метода дало значение расстояния до Солнца, равное примерно 136 млн. км.

Капитан Джеймс Кук во время своего первого путешествия (1768—1771) заново открыл Новую Зеландию и нанес на карту восточную береговую линию Австралии. Кука в основном влекли поиски знаний. Он интересовался географией, этнографией, другими науками. В 1769 г., когда Кук находился на суше в бухте Ботани, Австралия, он провел очень важное наблюдение. Очень редко, всего лишь два раза в 100 лет, с Земли видно, как планета Венера пересекает видимый диск Солнца. Это явление называется прохождением Венеры. Оно происходит так редко потому, что Земля и Венера лежат на орбитах, плоскости которых наклонены друг к другу. Поэтому Земля, Венера и Солнце почти никогда не находятся на одной прямой. Кук наблюдал прохождение Венеры и определил его время, находясь далеко на юге. Вместе с данными северных обсерваторий наблюдения Кука оказались очень полезными для уточнения знаний о размерах солнечной системы.

В 1877 г. шотландский астроном сэр Давид Джилл (1843—1914) отправился со своей женой к уединенному острову Восхождения в Южной Атлантике. На острове был только морской гарнизон. Именно здесь провел Джилл целый ряд своих классических наблюдений за планетой Марс, необходимых для определения размеров солнечной системы и расстояния до Солнца. Он наблюдал Марс в момент, когда тот был наиболее близок к Земле за все столетие. Он регулярно наблюдал положение планеты относительно фоновых звезд ранним утром и вечером. При обработке наблюдений ис-

пользовался тот факт, что вращение Земли смещает обсерваторию между наблюдениями на определенное известное расстояние. Джилл получил довольно точное значение расстояния до Солнца, равное 149 млн. км, в то время как большинство имевшихся оценок лежало в интервале от 144 до 152 млн. км. Джилл выбрал остров Восхождения случайно только из-за хорошей погоды и южного положения.

В 1931 г. благодаря очень близкому приближению к Земле астероида Эрот (25 млн. км) ученые смогли измерить расстояние до Солнца с точностью до 0,01 процента.

До сравнительно недавнего времени использование наблюдений планет было единственным средством определения расстояния от Солнца до Земли. Среднее значение этого расстояния настолько важно, что в современной астрономии ему дано определенное название: астрономическая единица. Однако в настоящее время используется для определения расстояния Солнце — Земля другой метод — радиолокационный. Он обладает феноменальной точностью — значение астрономической единицы определяется с ошибкой до нескольких километров!

Радиолокационный метод легко понять. Передатчик с Земли испускает импульсы радиоволн в сторону Венеры. Радиоволны частично отражаются от твердой поверхности планеты. Хотя возвращающийся сигнал очень слаб после прохождения пути в 100 млн. км от Земли к Венере и обратно, чувствительный радиотелескоп его обнаруживает. Обычно один и тот же телескоп используется в качестве передатчика и радиоприемника. По промежутку времени между передачей импульса и его приемом можно сразу же определить расстояние до планеты, так как радиоволны путешествуют со скоростью света, которая известна с точностью до 10^{-12} . С помощью радиолокационного метода расстояния в солнечной системе определяются с точностью до 10^{-8} . Это эквивалентно измерению расстояния между какими-то местами в Лондоне и Нью-Йорке с точностью до нескольких сантиметров. Однако в наши дни, когда космические корабли отправляются за пределы солнечной системы, такая точность жизненно необходима для успеха путешествий, которые могут длиться более 10 лет.

Видимый диаметр Солнца составляет около 32 дугowych минут (32'), немногим больше 0,5 градуса. Он несколько меняется при измерениях с Земли в разное время года. Это происходит потому, что Земля, двигаясь по эллиптической орбите, не всегда находится на одинаковом расстоянии от Солнца. Когда мы ближе всего к Солнцу (любопытно, что это

происходит в январе, самом холодном месяце северного полушария), диаметр солнечного диска составляет $32,5'$, тогда как в июле, когда расстояние от нас до Солнца самое большое, его видимый диаметр равен $31,5'$.

Данные об измерениях углового размера Солнца при различных расстояниях от него позволяют рассчитать истинный диаметр Солнца. Он равен приблизительно 1,4 млн. км, т. е. в 109 раз больше диаметра Земли. А объем Солнца больше объема Земли в 1,3 млн. раз.

Ньютоновский закон всемирного тяготения позволяет нам узнать массу Солнца. На Землю действует гравитационная сила, заставляющая ее обращаться по орбите вокруг Солнца. Скорость движения нашей планеты по орбите и ее расстояние до Солнца — это именно те две величины, которые определяют траекторию Земли. Масса Земли также входит в расчетную формулу, и поэтому измерения величин, связанных с движением Земли (скорости и расстояния), позволяют определить массу Солнца. Она примерно в 330 тыс. раз больше массы Земли и составляет $2 \cdot 10^{27}$ тонн (точнее, $1989 \cdot 10^{30}$ кг).

Если бы масса Солнца была в 2 раза больше этого значения, то, чтобы остаться на той же орбите, Земля должна была бы обращаться в 2 раза быстрее. И наоборот, при массе Солнца в 2 раза меньшей, скорость обращения Земли должна быть в 2 раза меньше.

Различие между массами Земли и Солнца можно продемонстрировать при помощи масштабной модели, в которой Земля весит 10 г, а Солнце — 3 т. Но в объеме различие еще больше. Это связано с тем, что Солнце состоит в среднем из менее плотного вещества, чем наша скалистая планета. Средняя плотность Земли равна $5,5 \text{ г/см}^3$. Средняя плотность Солнца всего лишь $1,4 \text{ г/см}^3$. Небольшая твердая Земля в среднем в 4 раза плотнее упакована, чем огромное огненное Солнце. Уже из этого можно догадаться, что Солнце состоит из газа, а не из твердого вещества, как Земля.

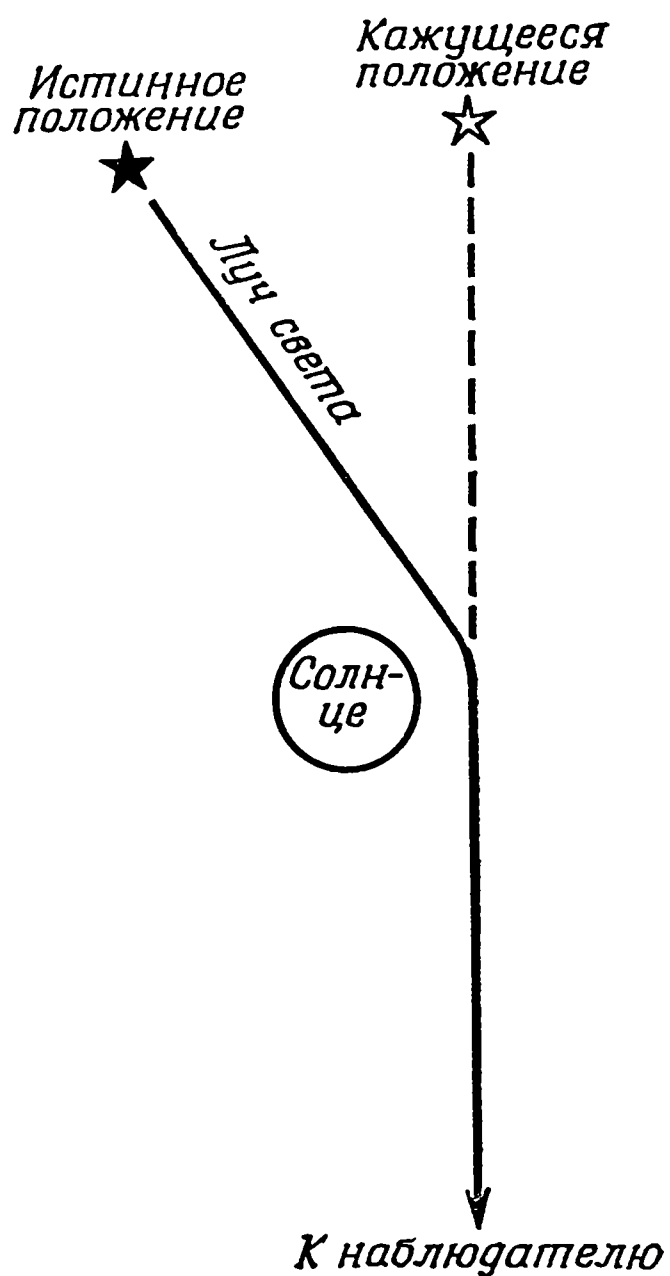
На Солнце сила тяжести в 28 раз больше, чем та, к которой мы привыкли на Земле. Это является следствием большей массы Солнца. Таким образом, вблизи Солнца средний человек весил бы больше 2 т. Чтобы улететь с Солнца, такому воображаемому человеку понадобилась бы очень мощная ракета, поскольку скорость, необходимая для преодоления силы притяжения Солнца, превышает 600 км/с. Мусор, выброшенный из такой ракеты, полетел бы в солнечную мусоросжигающую печь с потрясающей скоростью. За первую

секунду свободного падения на Солнце тело прошло бы 150 м, а на Земле всего 5 м.

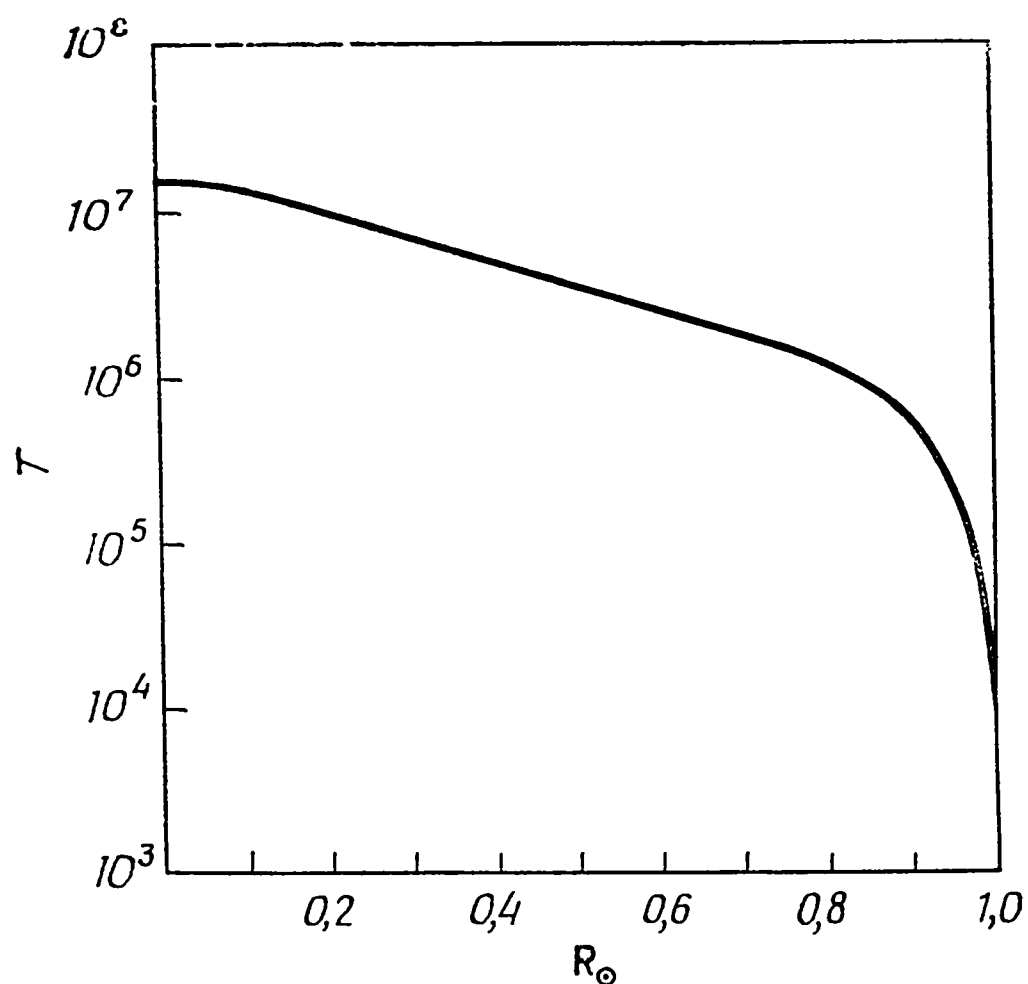
За последние 100 лет Солнце часто играло важную роль в исследованиях, представляющих значительный интерес для физиков. В начале XX столетия эффект, связанный с солнечной гравитацией, способствовал подтверждению общей теории относительности Эйнштейна. Эта знаменитая теория заменила геометрию прямых линий Эвклида и Ньютона геометрией искривленного пространства.

Эйнштейн показал, что при учете эффекта гравитации прямая линия не есть самое короткое расстояние между двумя точками. В частности, луч света будет следовать по слегка изогнутой траектории, если он проходит недалеко от тела значительной массы. Различия между теориями Ньютона и Эйнштейна чрезвычайно малы на уровне нашей повседневной жизни на Земле. Когда вы осторожно ведете машину по шоссе, вы подсознательно пользуетесь законами движения Ньютона, потому что поправки, вытекающие из теории относительности, смехотворно малы. От теории Ньютона необходимо отказаться в тех случаях, когда пространственные или временные масштабы огромны, или скорости чрезвычайно велики, или процессы происходят с участием тел большой массы. Именно вследствие своей огромной силы гравитации, приведшей к возникновению измеримых эффектов, Солнце дало возможность произвести проверку общей теории относительности.

По расчетам Эйнштейна, произведенным в 1915 г., луч света, проходящий вблизи Солнца, должен отклоняться от прямой линии на $1,75''$. Впервые возможность проверить это предсказание возникла в 1919 г. во время полного солнечного затмения. Экспедиция по наблюдению затмения была



Отклонение света звезды при прохождении вблизи Солнца было действительно обнаружено в точном соответствии с предсказанием общей теории относительности Эйнштейна в 1919 г. Успех наблюдений, организованных сэром Артуром Эддингтоном, утвердил высокую научную репутацию Эйнштейна.



Изменение температуры в недрах Солнца свидетельствует о различных физических условиях при переходе от его центра к поверхности.

организована Эддингтоном. Анализ фотографий, полученных во время затмения, показал, что луч света звезды, проходящий непосредственно вблизи края Солнца, отклонился на предсказанную Эйнштейном величину! Этот результат принес Эйнштейну всемирное признание.

Теория Эйнштейна помогла раскрыть еще одну загадку Солнца. Большая ось эллиптической орбиты Меркурия медленно, но неизменно поворачивается в пространстве. Удивительная ситуация: не только сама планета обращается вокруг Солнца, но и ее орбита. Из-за эффектов, связанных с общей теорией относительности, этот поворот имеет составляющую, равную $43''$ в столетие.

Таким образом, солнечные исследования помогли физикам-теоретикам найти подтверждение теории, которая в то время была наиболее сложной из когда-либо выдвигавшихся. И эта теория выдержала проверку временем. Общепринято, что она дает правильное описание отношений между материей, тяготением и структурой пространства и времени.

В настоящее время для более точной проверки общей теории относительности мы должны выйти за пределы солнечной системы, однако это нисколько не умаляет исторической важности классического наблюдения 1919 г.

Наблюдение Солнца и в дальнейшем будет вносить огромный вклад как в физику, так и в астрономию, поскольку

на Солнце происходят такие явления, какие никогда нельзя будет воспроизвести в земной лаборатории. Проверка теории относительности — один из примеров. Приведем и другие.

Только в астрофизической лаборатории возможны те вариации температуры, какие имеют место внутри Солнца и в его атмосфере. Измерения излучаемой Солнцем энергии показывают, что температура на его поверхности достигает приблизительно 6000 К. При такой температуре все известные нам твердые вещества расплавятся. Другими словами, мы еще не можем построить космический корабль, который не превратился бы в облако газа задолго до того, как он достигнет солнечной поверхности. Любопытно, что прозрачные внешние слои Солнца обладают еще более высокой температурой — в несколько миллионов градусов. При проникновении в глубь Солнца температура и давление растут, пока в центральных областях температура не достигнет нескольких млн. градусов, а давление станет в миллионы раз выше, чем на поверхности Земли. Поскольку ни один прибор не может проникнуть непосредственно даже на поверхность Солнца, внутреннее строение Солнца может быть реально исследовано только при помощи математики и вычислительных машин.

Какие же основные факты о Солнце мы хотим узнать? Поскольку Солнце как источник энергии влияет на все растущее идвигающееся на Земле, важно узнать как можно больше о природе той центральной энергостанции, которая питает Солнце. Также необходимо выяснить, постоянна ли излучаемая Солнцем энергия. Любое изменение ее величины могло бы сильно повлиять на климат и погоду на Земле. Не это ли является причиной климатических изменений, особенно таких, как наступление ледниковых периодов? Человек особенно зависим от колебаний солнечного излучения. Существование земных энергетических ресурсов, которые наша технология позволяет использовать, в большой степени затухало тот факт, что Солнце является единственным надежным и безопасным для окружающей среды источником энергии. Залежи каменного угля не слишком велики, а ядерная энергия слишком опасна, чтобы использовать ее в крупных масштабах. По-видимому, запасы дешевой энергии в конце концов будут исчерпаны. Будем надеяться, что это произойдет еще не скоро, однако энергетическая проблема непременно встанет в будущем.

При космических путешествиях поведение Солнца особенно важно. Земная атмосфера является прекрасной защитой



Полярное сияние на Аляске. Эта поразительная игра света — результат столкновений между заряженными частицами, мчащимися от Солнца, и атомами нашей атмосферы. (С.-И. Акасофу, Аляскинский университет.)

от опасных форм солнечной радиации. Другими словами, мы эволюционировали от низших млекопитающих (и их предшественников) в условиях, когда опасная радиация отсутствовала. Если бы эволюция происходила при наличии сильного потока ультрафиолетового излучения на поверхности Земли, у нас появилась бы очень толстая кожа! Астронавты — обычные люди, и поэтому космический корабль для безопасности команды должен обладать достаточной защитой от высокоэнергичной солнечной радиации. Когда астронавты должны покинуть космический корабль — для того, чтобы исследовать Луну или выполнить монтаж оборудования, — астрономы на Земле особенно тщательно наблюдают за Солнцем. Они следят за внезапными взрывами, выбрасывающими в космическое пространство смертельно опасное излучение, которое задерживается защитным покрытием космического корабля или нашей атмосферой, но проникает через обычный скафандр. Более глубокое понимание физики Солнца и солнечного излучения существенно необходимо для успешных полетов человека в космос, а также для прогноза погоды и моделирования климата. Астрономы, подобно другим ученым, хотят узнать как можно больше. Но получение знаний ради самих знаний эгоистично, особенно если оно требует затраты общественных средств. Просто сидеть за те-

лескопом и собирать информацию является бессмысленным занятием. Нужно, чтобы наблюдатель, пусть даже подсознательно, хотел помочь решению реальных задач. Здесь мы подходим к подлинной дилемме современного исследователя: для того чтобы суметь выполнить исследование, убедить ответственный комитет выделить общественные фонды, нужно найти такую небольшую задачу, которая может быть решена быстро. Современная научная работа обычно состоит из огромного ряда кажущихся незначительных исследований. Солнечная физика в этом отношении не является исключением. Но мы надеемся, что в конечном результате наша возможность открыть важные закономерности увеличится.

Многие проблемы еще остались нерешенными. Например, мы хотим выяснить более детально, как работает основной механизм генерации солнечной энергии. Это важно для понимания не только Солнца, но и звезд. Теоретические исследования могут дать ответ, в частности, на вопрос, долго ли сможет Солнце оставаться таким же, как сейчас. Изучение Солнца может также пролить свет на состав Вселенной.

Связь между Землей и Солнцем определяется не только влиянием Солнца на климат. Непрерывно проносится мимо Земли испускаемый Солнцем поток атомных частиц, называемый солнечным ветром. Этот поток, содержащий электрически заряженные частицы, вызывает, в частности, появление в полярных зонах Земли необыкновенно красивых полярных сияний. Исследование солнечного ветра очень важно для радиосвязи, так как электрически заряженные частицы солнечного ветра взаимодействуют со слоями нашей атмосферы, ответственными за отражение радиоволн. Изменение Солнцем структуры атмосферного слоя Земли может привести к исчезновению радиосвязи на длинных трассах. Наконец, изучение Солнца может пролить свет на ряд вопросов, испокон веку интересовавших мыслящих людей. Откуда взялась солнечная система? Когда она образовалась, из какого вещества она состоит? Теория и наблюдения совместными усилиями дают оценки возраста Солнца. Солнечное излучение содержит также важную информацию о химическом составе внешних слоев Солнца. В этих областях основные химические элементы все еще содержатся в такой же пропорции, как и вещество, из которого были образованы Солнце и молодые планеты. Химический состав этих планет резко изменился со времени их образования, особенно ближайших к Солнцу, планет потерявших большую часть легких элементов, когда-то в них содержавшихся. Как и из каких веществ образовалась Земля? Чтобы ответить на этот вопрос, мы должны перенести наше внимание от нашего земного «дома» к центру солнечной системы.

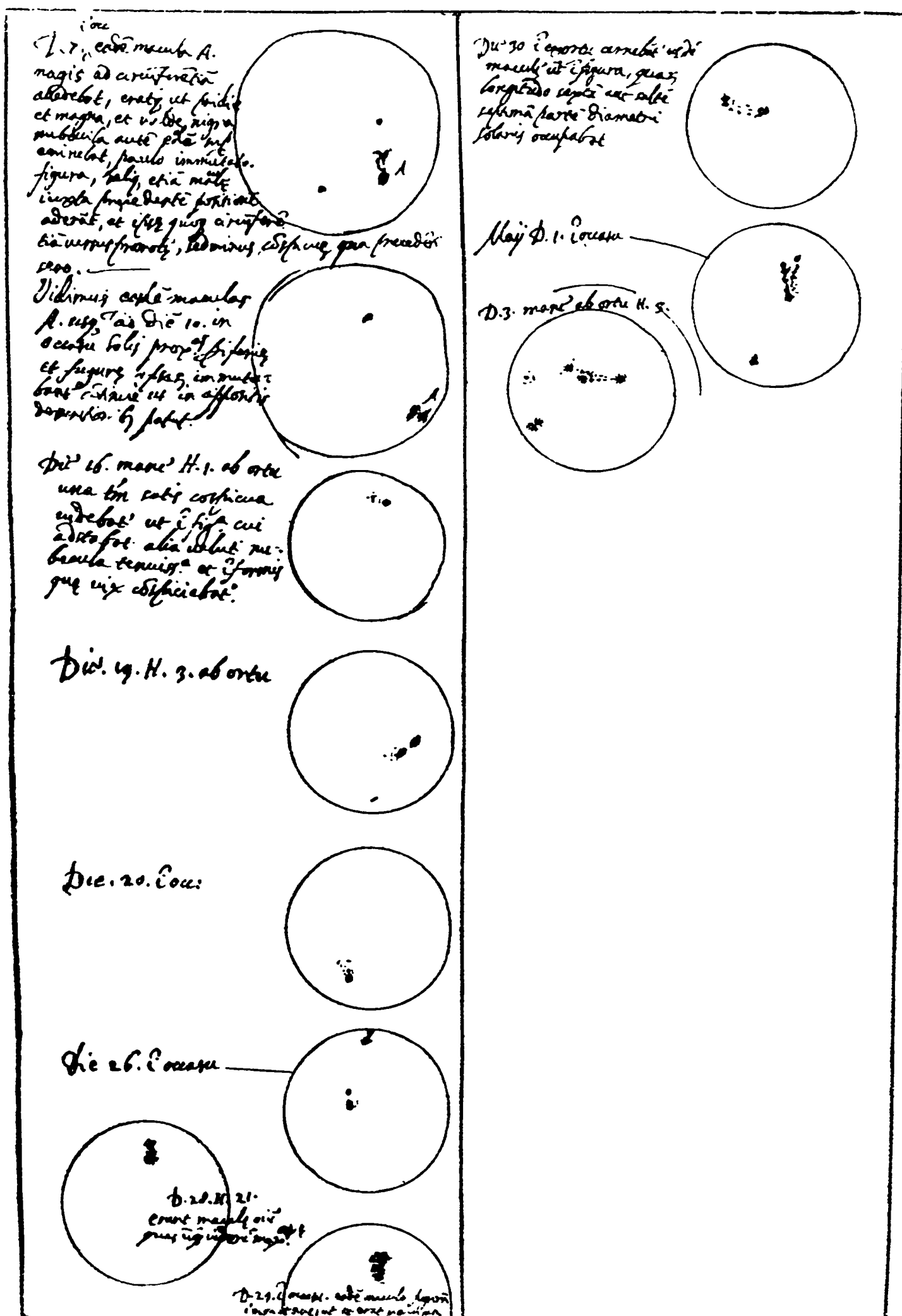
3

Солнечные инструменты

Первые наблюдатели Солнца имели в своем распоряжении лишь дерево и камень. Они проводили специальные линии и основывали обсерватории, чтобы иметь возможность следить за годичным циклом восходов и заходов Солнца. Они могли измерять лишь углы, однако даже из этих грубых данных извлекали, по-видимому, полезную информацию о временах года и затмениях.

Как резко контрастируют эти простые методы со сложностью современной солнечной обсерватории! При помощи современных телескопов можно наблюдать Солнце в различных участках спектра: в белом свете, инфракрасных тепловых лучах, невидимом ультрафиолете, рентгене и в радиодиапазоне. Без телескопов мы бы знали только о положении Солнца на небе, не больше. На вершинах гор, где атмосфера прозрачна, оптические телескопы непрерывно следят за Солнцем. Когда Солнце садится на одном континенте, оно поднимается на другом, и мировая сеть службы Солнца не прерывается из-за естественной смены дня и ночи. Подобным же образом регистрируется тепловой поток от Солнца, в особенности на метеорологических станциях. Приборы, установленные на искусственных спутниках Земли, следят за неожиданными всплесками солнечного излучения высоких энергий. А в Австралии сложная система из 96 радиотелескопов способна давать радиоизображения Солнца и находить области необычной активности.

Все эти способы наблюдения Солнца, из которых мы упомянули всего лишь несколько, служат для получения все большего количества надежной информации о нашей дневной звезде. Накопленные данные могут служить одновременно стимулом развития теории и обеспечивать ее проверку. Непредвиденные результаты приводят к созданию новых моделей определенного аспекта деятельности Солнца, а существующая уже информация накладывает ограничения на предположения, используемые учеными при создании моделей. Наблюдения и теория помогают друг другу; это обычный способ развития любой науки. Теория должна объяснять при помощи физических законов те результаты, которые уже получены, и дать надежный прогноз на будущее. Некоторые проблемы солнечной астрономии может решить лишь теория. Только она может ответить на вопрос, сколько



Наблюдения Галилея, впервые надежно установившего существование солнечных пятен. (Иеркская обсерватория, США.)

будет жить Солнце. Однако ответ станет достоверным, если он будет опираться на надежные данные. Потребность в получении большого количества высококачественной информации привела к конструированию телескопов, специально предназначенных для наблюдения разнообразных сторон деятельности Солнца.

Галилей первый, насколько известно, направил зрительную трубу на Солнце. Но ни при каких обстоятельствах не повторяйте этот чрезвычайно рискованный для зрения эксперимент. Можно наблюдать Солнце при помощи телескопа следующим полностью безопасным способом.

Надо сконструировать телескоп так, чтобы сфокусированное изображение образовывалось не на нормальном расстоянии от глаза, а на некотором расстоянии от окуляра. Это достигается путем перемещения окуляра относительно его обычного при астрономических наблюдениях положения. Удобнее, если светосила окуляра будет небольшой. Вернемся к конструкции телескопа. Для полной безопасности я бы рекомендовал совсем убрать маленькую трубу-искатель телескопа, закрепленную на основной трубе, чтобы у непредупрежденного наблюдателя не возникло искушение взглянуть на Солнце в искатель хотя бы на минуту. После того как искатель убран, установим защитный экран вокруг переднего края зрительной трубы. Он будет защищать экран, на который проектируется изображение Солнца, от прямого солнечного света. Не надо особой изобретательности для создания такого экрана! Я иногда использую обычный кусок картона и вырезаю в нем дырку так, чтобы картон плотно сидел на трубе. Важно, чтобы труба была укреплена на какой-то опоре — ведь весь смысл эксперимента состоит в том, чтобы устранить необходимость смотреть вдоль направления трубы на Солнце, а если трубу держать в руках, то, не глядя вдоль нее, Солнце не поймашь.

Зрительная труба с экраном от прямого солнечного света направляется на Солнце методом последовательных приближений. Солнечное изображение проектируется на кусок белого картона, помещаемого перед окуляром. Постепенно вы научитесь довольно легко получать на экране сфокусированное резкое солнечное изображение. Если диаметр его составляет несколько сантиметров, то одно или несколько солнечных пятен могут быть хорошо видны. В результате внимательного рассмотрения в течение нескольких минут можно легко отличить солнечные пятна с их характерной полутенью от изображений пылинок в зрительной трубе. Рассматривать на таком экране Солнце и безопасно, и любопытно. Если наблюдать в течение достаточно длительного периода, то можно увидеть, как меняется картина на поверхности Солнца, которое так ошибочно считалось Аристотелем «беспорочным». Такой эксперимент хорошо проводить и в школе на уроках астрономии, поскольку он представляет собой одну из немногих астрономических демонстраций, возможных в дневное



Очень опасно прямо смотреть на Солнце! Автор демонстрирует безопасный способ наблюдать солнечные пятна путем проецирования на экран изображения от простого телескопа. (Дж. Миттон.)

время. Но не забывайте, что нельзя смотреть через окуляр прямо на Солнце!

И еще одно предупреждение. Недорогие телескопы часто снабжаются небольшими солнечными фильтрами для использования совместно с окуляром. Предполагается, что темное стекло не пропускает излучение Солнца. Хотя частично это верно, пользоваться такими фильтрами опасно. Линзы телескопа, даже самые маленькие, собирают по крайней мере в 100 раз больше света, чем невооруженный глаз. Так что даже если фильтр поглощает 99 % излучения, оставшийся

свет все еще может ослепить. Кроме того, из-за нагрева фильтр может треснуть (помните, что кусочек горячего сломанного стекла может вызвать пожар!), и ваш глаз окажется совсем незащищенным. Наконец, дешевые фильтры не полностью задерживают ультрафиолетовое излучение, а оно наиболее опасно. Британский астроном-любитель Патрик Мур рекомендует эти фильтры утопить в море! Ну, я думаю, достаточно их просто выбросить, не то какой-нибудь не очень умный наблюдатель вдруг решит ими воспользоваться.

При работе с более дорогими любительскими телескопами можно использовать совсем другой тип фильтра, так называемый интерференционный. Эти фильтры располагаются перед входной апертурой телескопа. Для уменьшения проходящего через них излучения здесь используются физические свойства самого света. Из-за очень малой полосы пропускания через эти фильтры проходит лишь 0,1 % солнечного света. Мы встретимся с этими фильтрами позже, поскольку они широко используются в научных исследованиях Солнца. Стоимость таких фильтров, выпускаемых для любителей, составляет несколько сотен американских долларов. При помощи таких фильтров квалифицированный любитель сможет увидеть интересные явления на Солнце.

Многие владельцы телескопов хотят заняться фотографированием Солнца. Это уже особая задача, но успешное ее выполнение даст большое удовлетворение. Основная проблема заключается, конечно, в чрезвычайно высоких потоках тепла и света. Существуют специальные методы для преодоления этих трудностей, однако здесь мы не будем вдаваться в детали.

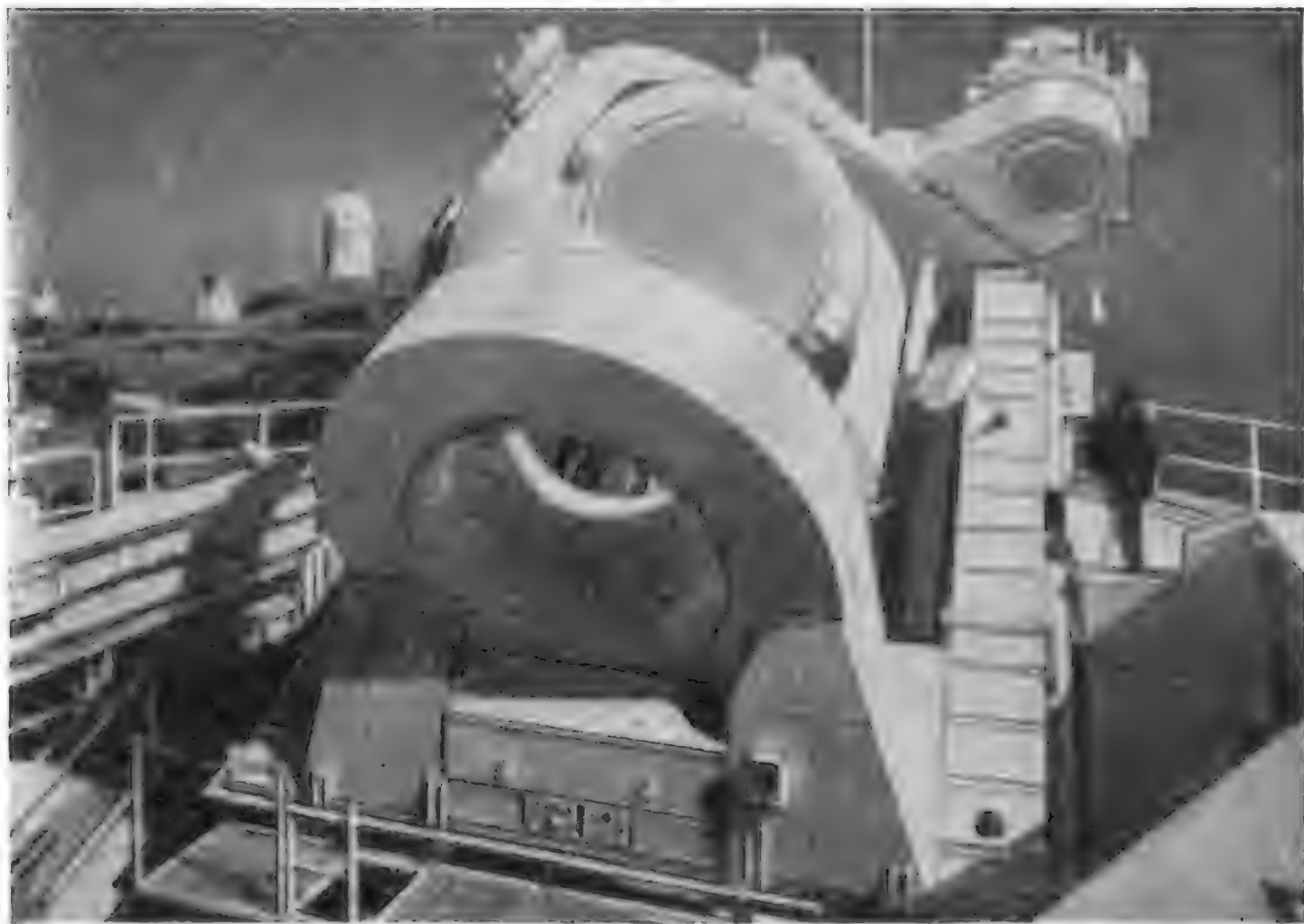
Для работы научных обсерваторий, проводящих солнечные исследования, необходимы приборы различного типа. Разумеется, каждая обсерватория специализируется в какой-то определенной области исследования, и поэтому имеет не все солнечные инструменты, а только те, которые необходимы для таких исследований.

Естественно, что астрономов интересует величина энергии, излучаемой Солнцем. На практике для этого измеряется количество энергии, получаемой от Солнца Землей, а затем, исходя из геометрических соображений, определяется энергия солнечного излучения или светимость. Количество энергии, падающей в 1 с на 1 м² верхней поверхности нашей атмосферы, называется солнечным параметром. Его раньше обычно называли солнечной постоянной, однако астрономы и метеорологи в последнее время обнаружили, что эта величина на самом деле может немного меняться. Как вы заметили, солнечный параметр определяется через энергию, пада-

ющую на поверхность нашей атмосферы, а не на поверхность Земли. Это связано с тем, что прозрачность воздуха в разных частях Земли различна. Если измерения производятся на поверхности Земли, то должна быть введена поправка, учитывающая поглощение атмосферы. В измерении интенсивности приходящего на Землю солнечного излучения нуждаются как астрономы, так и метеорологи. Принцип измерения заключается в достаточно точном определении температуры тела, которое нагревается падающим на него солнечным излучением, либо в подсчете числа электронов, освобождающихся в полупроводнике под влиянием солнечного света. Эти приборы называются по-разному: термопилы, болометры, радиометры и пиргелиометры. Однако нас интересуют не технические детали, а основные принципы.

Еще в 1837 г. Пуле измерил интенсивность солнечного излучения следующим удивительно простым способом. Он взял медный горшок, выкрасил его в черный цвет, чтобы уменьшить отражение света, и наполнил его водой, в которую погрузил термометр. Сначала он измерил температуру воды, когда черный горшок стоял в тени. Затем он вынес его на Солнце и каждую минуту фиксировал подъем температуры. Поправка на атмосферное поглощение, которую он сделал, оказалась с точностью до 10% близка к правильному значению. Не правда ли, это поразительно: не тратя денег и пользуясь домашней утварью, Пуле получил ответ, вполне пригодный для повседневных задач. При усовершенствовании этого метода были созданы приборы, измеряющие солнечное излучение по всему спектральному диапазону от инфракрасного до ультрафиолетового. Например, спектроболометр — прибор, также изготовленный в прошлом столетии, измеряет распределение энергии по спектру.

На расстоянии в одну астрономическую единицу (примерно 172 млн. км) от Солнца поток энергии составляет $1,36 \text{ кВт/м}^2$. Этот поток не полностью достигает поверхности Земли. Если Солнце находится точно в зените, то мощность около 1 кВт/м^2 падает на Землю. Умножив эту величину на площадь сферы с радиусом в одну астрономическую единицу, определим полное количество солнечной энергии, излучаемой Солнцем в космическое пространство. Оно очень велико: $3,83 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$, причем на Землю приходится $2 \cdot 10^{17} \text{ Вт}$. Такие цифры трудно представить разумом: ведь 10^{26} — это 1, за которой следует 26 нулей! Сопоставим две цифры: величина солнечной энергии, достигающая поверхности Земли, превышает 10^{14} кВт , в то время как вся



Гелиостат на вершине башни телескопа Мак-Мас. Зеркало следует за Солнцем и отражает его изображение в нижнюю часть башни. На снимке видны также несколько других телескопов обсерватории Китт-Пик, США.

мощность, вырабатываемая человечеством, составляет примерно $3 \cdot 10^9$ кВт, т. е. в 30 000 раз меньше.

Теперь зададимся вопросом, как сопоставить энергию нашей дневной звезды с энергией, приходящей от других звезд. Отклонимся немного в сторону и обсудим понятие звездной величины. Это понятие было введено 25 веков тому назад греческим философом Гиппархом для относительного сопоставления яркости звезд. Как видите, астрономия — наука, оперирующая иногда очень древними понятиями (правда, не только астрономия: например, мощность двигателей внутреннего сгорания выражается в лошадиных силах, а не киловаттах). По шкале Гиппарха самым ярким звездам была приспана первая звездная величина, а звездам едва заметным глазу — шестая. Все остальные звезды помещались в интервале между 1 и 6. Конечно, впоследствии с учетом научных достижений XIX столетия, система была модернизирована, а видимая яркость звезд определена с точностью до второго знака после запятой.

Вероятно, вы заметили, что при такой системе чем слабее звезда, тем выше значение ее звездной величины. Самые слабые объекты, едва видимые при помощи телескопов, имеют звездную величину, примерно равную $+26$. Звездная величина самой яркой звезды на нашем небе, Сириуса, равна

—1,42, а планеты Венера в максимуме яркости —4,4. Видимая звездная величина нашего Солнца равна —26,7. Более чем 52 звездные величины, или 10^{21} в единицах относительной энергии, получаемой Землей, отделяют Солнце от самых слабых галактик. От Солнца приходит столько же света, сколько мы получили бы от 10^4 млн. звезд, подобных Сириусу. Необходимо подчеркнуть, что такое различие связано не с тем, что Солнце является сверхмощной звездой, а просто потому, что оно близко от нас.

Астрономы заинтересованы в измерении солнечной энергии для того, чтобы понять, как работает Солнце. Метеорологи интересуются Солнцем с точки зрения его влияния на климат. Для этого на тысячах метеорологических станций, разбросанных по всему миру, ежедневно измеряется интенсивность солнечного излучения.

Для того чтобы следить, что происходит на солнечной поверхности, или, как говорят, за погодой на Солнце, нужны телескопы специального рода. Они обычно совсем не похожи на другие астрономические телескопы из-за двух основных факторов. Во-первых, траектория Солнца по небу проходит в фиксированных интервалах высот и углов относительно горизонта, поэтому в отличие от астрономических телескопов не нужно, чтобы телескоп мог быть направлен на любую точку неба. Во-вторых, яркость Солнца достаточно велика, и задача заключается не в том, чтобы собрать большое количество света, а в получении изображений высокого качества. Первая особенность приводит к тому, что часто основная структура телескопа неподвижна, и только единственное подвижное зеркало, называемое гелиостатом, служит для направления света в телескоп. Из второй особенности вытекает необходимость использовать длиннофокусные зеркала или объективы для построения изображения Солнца, так как при этом солнечные изображения имеют большие размеры и не так ярки.

Одним из самых больших современных солнечных телескопов является солнечный телескоп типа Мак-Мас Национальной обсерватории Китт-Пик, США, Аризона. Днем он используется для изучения Солнца, а ночью на нем можно производить некоторые звездные работы. На высокой 35-метровой башне укреплен гелиостат. Это следящее за Солнцем зеркало имеет диаметр 1,5 м, оно поворачивается вслед за Солнцем и отражает солнечный свет вниз вдоль оси телескопа. Главная ось телескопа параллельна оси вращения Земли. Фокусное расстояние равно 90 м, поэтому 3/5 телескопа расположены под поверхностью Земли. Большой фокус телескопа приводит к образованию большого изображения

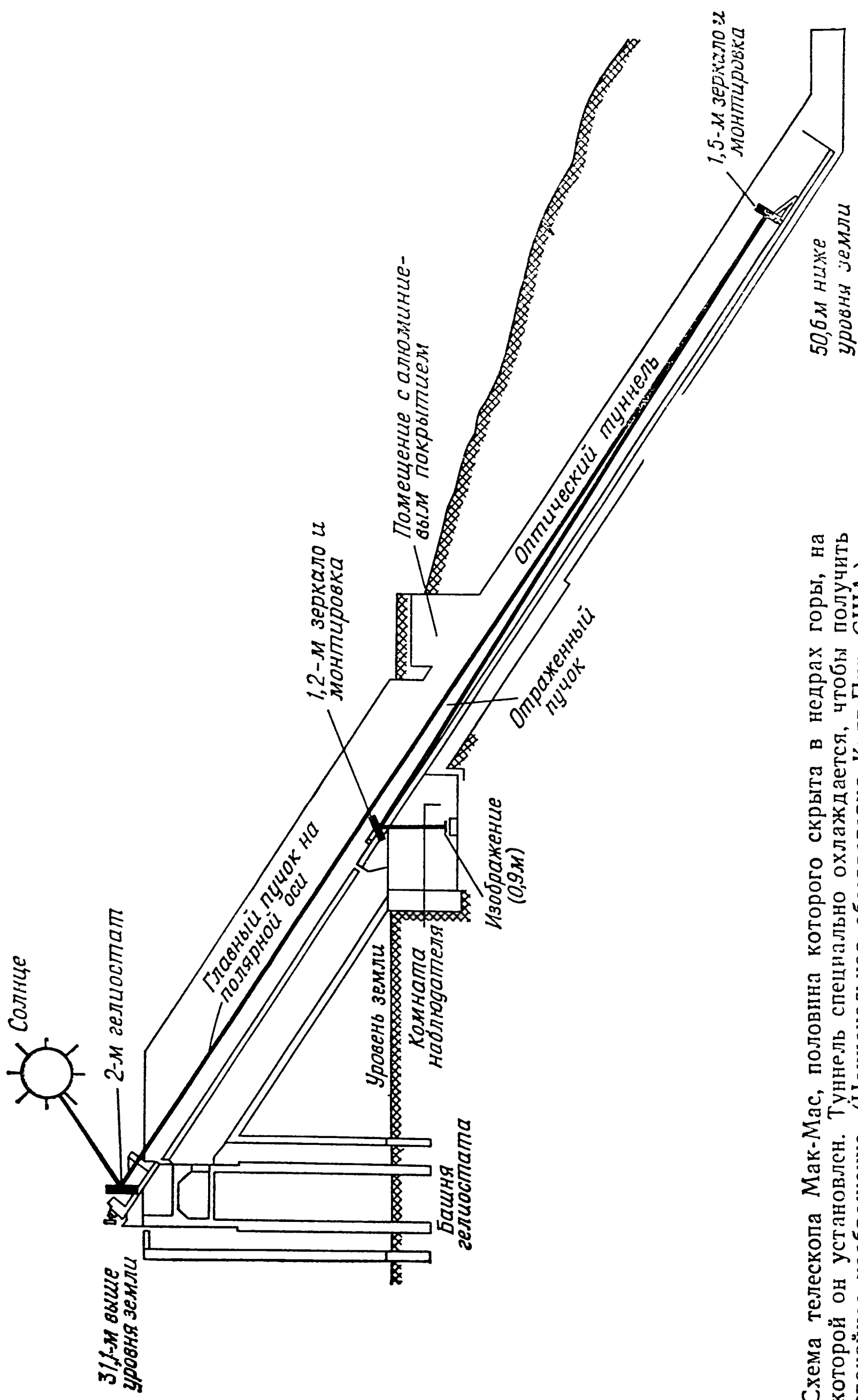


Схема телескопа Мак-Мас, половина которого скрыта в недрах горы, на которой он установлен. Туннель специально охлаждается, чтобы получить спокойное изображение. (Национальная обсерватория Китт-Пик, США.)



Изображение Солнца строится на специальном столе в помещении наблюдателей телескопа Мак-Мас. (Национальная обсерватория Китт-Пик, США.)

Солнца диаметром в 90 см. Это позволяет солнечным астрономам различать на поверхности Солнца многочисленные детали и их изменения день ото дня. Чтобы изображение Солнца было стабильным, воздух внутри телескопа охлаждается. Для этого по трубам, проложенным вдоль стен башни, пропускается холодная вода. На этом замечательном телескопе «солнечники» могут детально исследовать магнитные поля, движение и состав атмосферы Солнца.

Солнечные башни имеются на ряде обсерваторий. В основном они похожи на солнечный телескоп обсерватории Кит-Пик, хотя конструкция основного туннеля обычно вертикальна, а не наклонна. В США такие башни имеются на обсерваториях Маунт Вилсон и Биг Бер. Обсерватория Биг Бер расположена посреди маленького горного озера. Такое место было выбрано потому, что наблюдения Солнца проводятся чаще всего около полудня, когда Солнце сильно нагревает окружающее пространство. В результате солнечное изображение из-за поднимающихся потоков теплого воздуха портится, замывается. Над большим пространством воды этот эффект намного слабее.

Солнце исследуется не только путем прямого фотографирования, но и при помощи исследования спектра излучения. Этим занимается солнечная спектроскопия. Солнечный спектр несет в себе важную информацию о температуре и составе

внешних слоев Солнца. Примером солнечного спектра в природе является радуга, возникающая в результате отражения и преломления света Солнца в водяных каплях. Однако спектры радуги не столь совершенны, чтобы по ним можно было исследовать Солнце.

Первым серьезным спектроскопистом был самый выдающийся из кембриджских астрономов Исаак Ньютон. Научная работа Ньютона охватывала такие области, как математика, природа света, астрономия и гравитация. В конце своей жизни он был назначен на должность сначала хранителя, а потом и директора Королевского Монетного двора. В память об этом в Великобритании в 1978 г. была выпущена банкнота достоинством в один фунт, на оборотной стороне которой были перечислены (частично неверно) некоторые из научных достижений Ньютона, в частности его планетарная теория, работы в спектроскопии, создание отражательного телескопа. Ньютон провел многочисленные оптические опыты и показал, что призма расщепляет белый свет на различные цвета. В 1665 г. он произвел разложение солнечного света, поставив призму на пути узкого пучка света, проникающего в комнату через щель в оконных ставнях. Другое важное открытие в области спектроскопии сделал ученый и астроном Вильям Гершель. Он устанавливал термометр в различных по цвету участках спектра и регистрировал температуру. Показания термометра росли при переходе от синего цвета к красному. К своему большому удивлению он обнаружил, что, если передвинуть термометр дальше за красный участок спектра в невидимую его часть, температура продолжает расти! Гершель совершенно случайно натолкнулся на невидимую тепловую радиацию и тем самым основал новую область науки — инфракрасную астрономию.

Продолжая исследования солнечного спектра, Вильям Волластон (который был частично слеп) сначала послал солнечный свет на призму через узкую щель. В 1902 г. он обнаружил, что в спектре солнечного света существуют темные полосы. Он насчитал семь таких полос: две в красной части, три в зеленой и две в сине-фиолетовой. Это замечательное открытие привлекло внимание к Солнцу многих исследователей. В 1814 г. Йозеф фон Фраунгофер в Мюнхене получил солнечный спектр хорошего качества. Он зарегистрировал около 500 линий. В честь этого открытия все темные линии спектра Солнца называются фраунгоферовыми.

В 1821 г. Фраунгофер ввел существенное усовершенствование в области солнечной спектроскопии, начав использовать дифракционную решетку вместо призмы. Решетка работает на принципе дифракции, в то время как в призме про-



50-метровая башня солнечного телескопа обсерватории Маунт Вилсон вблизи Лос-Анджелеса. (Хейловская обсерватория, США.)

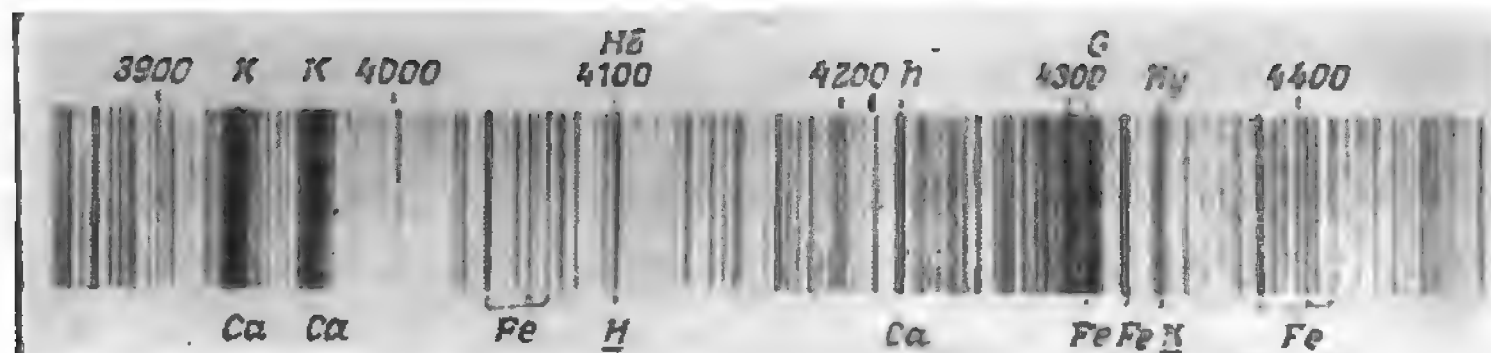
исходит рефракция или изменение направления света. Это связано с тем, что в более плотных средах распространение света происходит с меньшей скоростью, причем уменьшение скорости зависит от длины волны: красный свет распространяется медленнее синего. Дифракцию понять немного труднее, но принцип явления можно описать следующим образом.

Когда луч света встречается край твердого препятствия, он рассеивается этим экраном в виде расходящегося пучка. Если таких краев много, как, например, при прохождении



Обсерватория Биг Бэр — это солнечный телескоп на озере. Масса воды способствует спокойствию воздуха днем, когда ведутся наблюдения Солнца. (Солнечная обсерватория Биг Бэр, США.)

через решетку, состоящую из сотен тонких нитей, то рассеянный свет представляет собой целый ряд расходящихся пучков. Свет, дифрагированный элементами решетки, вдоль



Небольшая часть солнечного спектра, на которой хорошо видны многочисленные темные линии, впервые исследованные Волластоном и Фраунгофером. (Хейловская обсерватория, США.)

некоторых направлений будет усиливаться. Усиление возникает, если разность хода лучей, идущих от различных элементов, равна целому числу длин волн. Поскольку величина разности хода зависит от длины волны, то свет усиливается в данном направлении только для определенной длины вол-

ны. Поэтому, когда мы смотрим на решетку под различными углами, мы видим максимумы яркости, соответствующие различным длинам волн, т. е. видим солнечный свет, разложенный в спектр. Если вы никогда не видели такую картину, то, вероятно, наше упрощенное объяснение не очень убедительно. Подобный эффект вы можете наблюдать, наклоняя обычную грампластинку относительно падающего солнечного света. Бороздки пластинки здесь играют роль штрихов решетки.

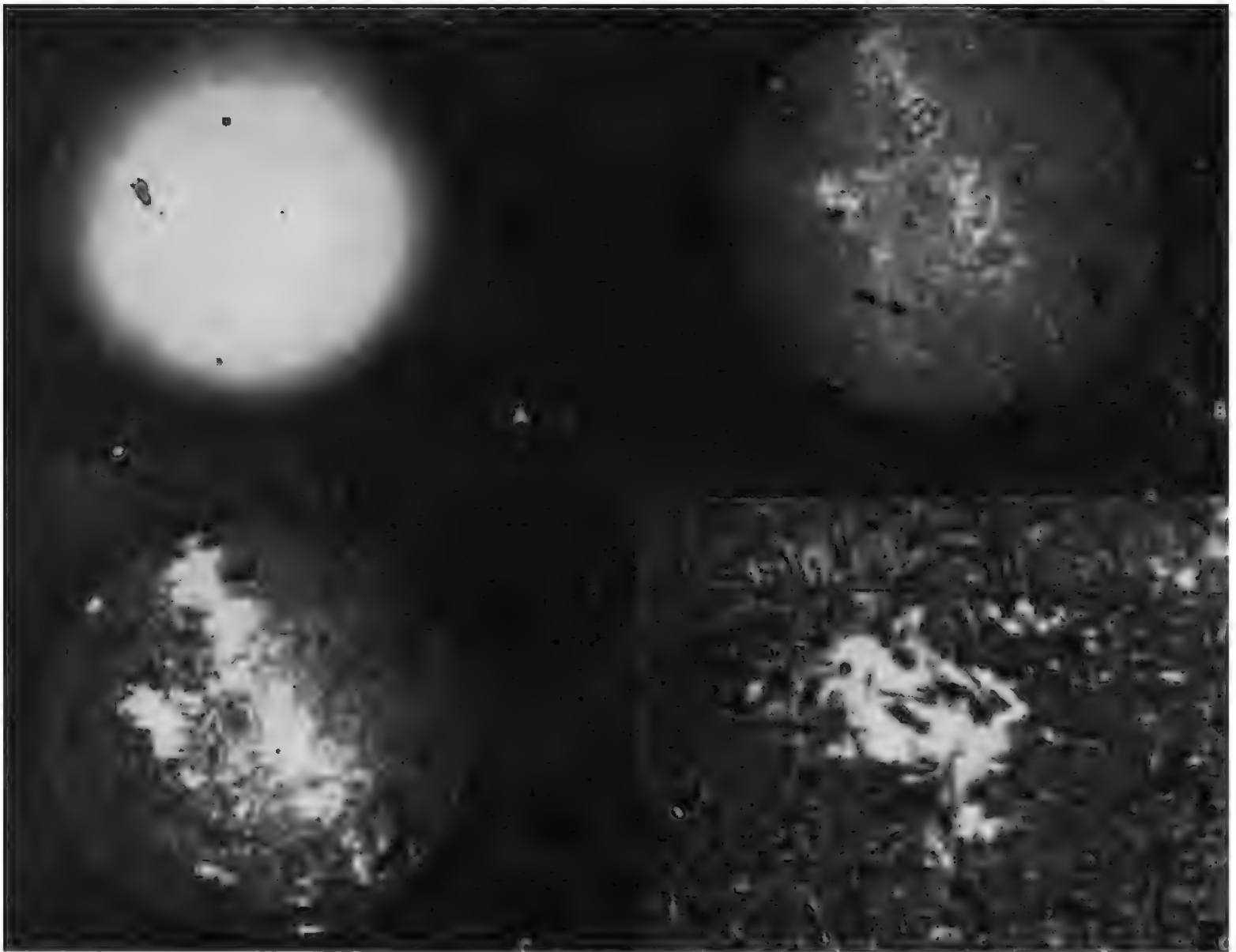
В солнечной спектроскопии используются большие решетки, достигающие 10 см, на которых нанесены десятки тысяч штрихов. При совместном использовании телескопа и спектрометра можно изучать спектр различных частей солнечного диска, и исследовать изменения температуры, состава и скорости внешних слоев Солнца. Каждый слой солнечной атмосферы характеризуется определенным интервалом значений температуры и давления. Поэтому и оптические свойства каждого слоя различны. Так же как геологи последовательно снимают слои земной поверхности, соответствующие различным эпохам истории Земли, так и спектроскописты своими методами могут проникать сквозь различные слои атмосферы Солнца.

Для усиления контраста фотографии часто используют цветные фильтры. Желая запечатлеть образование облаков, они ставят перед объективом красный фильтр, отсекая голубой цвет ясного неба. Подобная методика дает ценные результаты в астрономии. Так, у спиральной галактики, сфотографированной в синем свете, хорошо видны рукава; рисунок газовой туманности, наоборот, рельефнее виден в красном свете. Однако используемые для этих целей цветные стекла или желатиновые фильтры широкополосны, так, они могут пропускать свет в полосе длин волн, равной примерно 100 нанометрам (нанометр составляет 10^{-9} м и часто выражается в ангстремах, 1 нанометр равен $10 \text{ \AA}$). Для научной работы имеются фильтры с меньшей полосой пропускания до 0,01 нанометра, или $0,1 \text{ \AA}$. Для построения таких фильтров используется принцип интерференции света в оптической системе фильтра. Свет отражается на различных элементах фильтра таким образом, что в результате гасится все, кроме излучения в выбранном спектральном интервале, который может быть сделан очень узким (до 0,01 нм). (Как было упомянуто выше, только через такие фильтры можно смотреть прямо на Солнце.) Интерференционный фильтр может обрезать 99,95 % падающего света, зато излучение в выбранном интервале длин волн проходит полностью. Достоинство этих фильтров заключается как раз в том, что можно рассматри-

вать солнечный диск в очень узком участке спектра. Как мы увидим, это очень важно для изучения различных слоев атмосферы Солнца.

Солнечный свет излучается различными слоями солнечной атмосферы. Как я уже отмечал, температура и давление меняются во внешних слоях Солнца. Красное излучение приходит из более глубоких слоев, чем синее. Желтый свет Солнца, видимый нами невооруженным глазом, является смесью излучений, выходящих из различных слоев. Изучая Солнце в определенных длинах волн, мы тем самым рассматриваем различные слои солнечной «луковицы». Это очень мощное средство для выделения отдельных слоев, особенно если наблюдения ведутся в одной из фраунгоферовых спектральных линий. Например, на фотографиях (называемых спектрогелиограммами), полученных в свете линии К (λ 393,4 нм) ионизованного атома кальция, видны яркие области, особенно вблизи солнечных пятен, где атомы кальция чрезвычайно возбуждены.

Заслуга в изобретении устройства для получения фотографии Солнца в узком спектральном диапазоне (т. е. в монохроматическом свете) принадлежит двум исследователям: Джоржу Хейлу из США и Деландру из Франции. Оба изобрели спектрогелиограф одновременно и независимо друг от друга. Гений американской астрономии Хейл построил первый такой прибор в своей личной обсерватории вблизи Чикаго. В 1889 г., будучи еще студентом Массачусетского технологического института, Хейл видоизменил Гарвардский спектрограф так, что можно было получить изображение Солнца в одной спектральной линии. Хейлу тогда был всего 21 год. Основной принцип метода легко понять. Солнечный телескоп образует изображение Солнца на щели спектрографа, и в спектрограф через эту щель проникает узкая полоска поверхности Солнца. Эта «полоска Солнца» в спектрографе при помощи призм и решетки разлагается в спектр, и в каждой спектральной линии мы имеем по существу монохроматическое изображение щели спектрографа. Можно расположить фотографическую пластинку в спектрографе так, чтобы на нее падала только одна сильная линия, например H_{α} . Тогда на этой пластинке будет зарегистрировано монохроматическое (в H_{α}) изображение одной узкой полоски поверхности Солнца. Если начать одновременно и синхронно двигать изображение Солнца на входной щели спектрографа и фотографическую пластинку, то на пластинке мы можем получить непрерывное монохроматическое изображение диска Солнца (подобно тому, как сканирующий растр позволяет получить телевизионное изображе-



Три изображения Солнца в свете различных длин волн иллюстрируют, как светофильтры помогают астрономам выявлять структуру различных слоев солнечной атмосферы: *A* — в белом свете; *B* — в линии водорода; *C* — в линии кальция. *D* — увеличенное изображение области вспышки в свете красной линии водорода. (Хейловская обсерватория, США.)

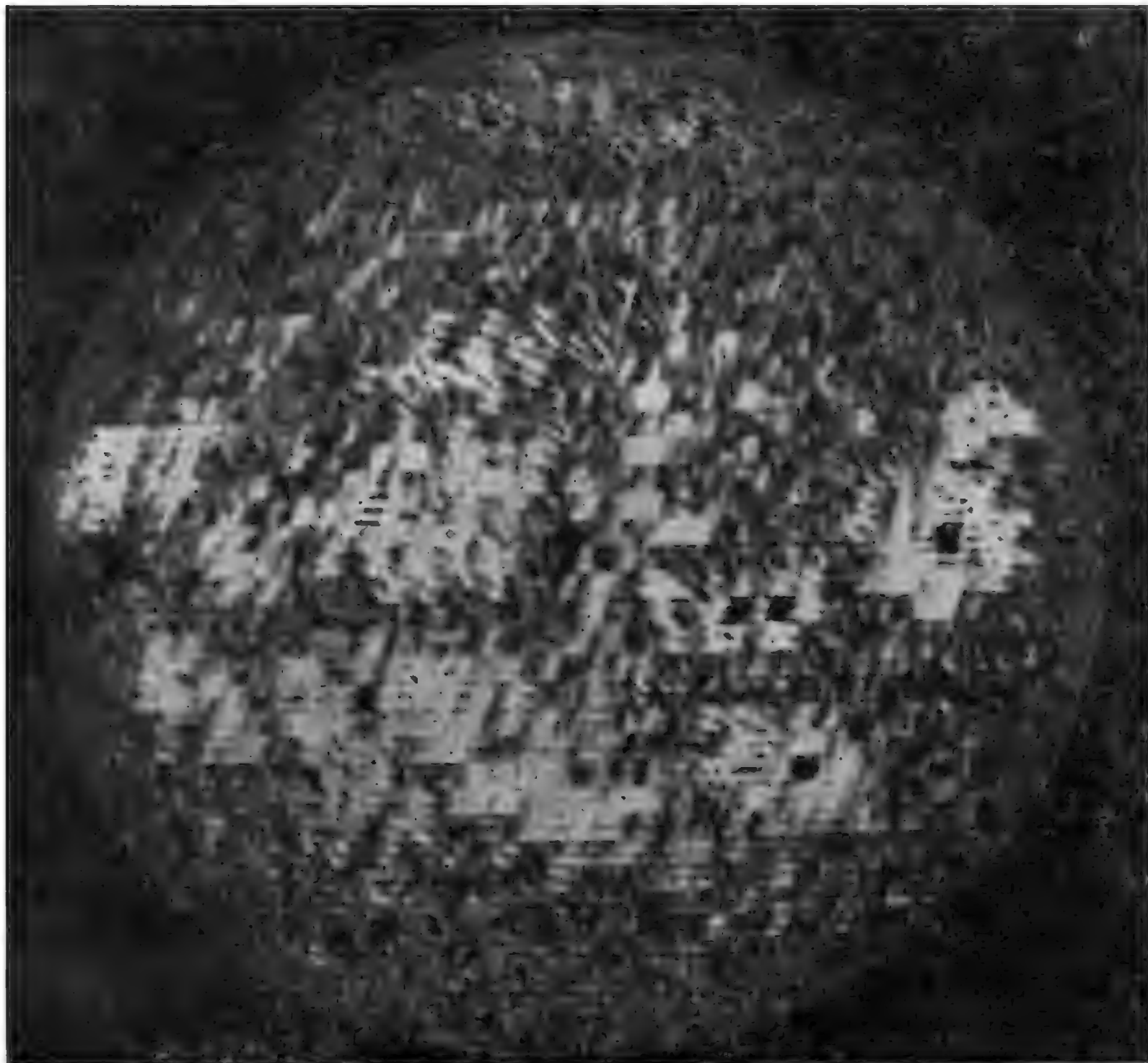
ние). Такова основная идея спектрогелиоскопа. В настоящее время для получения монохроматических изображений Солнца используются интерференционные фильтры, они и по цене доступны любителям астрономии. У таких фильтров нет движущихся частей, работа с ними не сложна, а скорость получения снимков высока.

В дальнейшем Хейл изобрел еще один прибор солнечной астрономии — магнитограф. В июне 1908 г., рассматривая солнечный спектр высокого разрешения, Хейл заметил, что спектральные линии излучения солнечных пятен расщеплены на несколько линий. Ранее в 1896 г. датский физик Зееман показал, что если атомы источника света находятся в области сильного магнитного поля, то некоторые спектральные линии расщепляются на отдельные составляющие. Такой эффект возникает из-за того, что энергетические уровни внешних электронов атома при наличии сильного магнитного поля

разделяются на несколько подуровней. В результате отдельные спектральные линии уширяются или расщепляются на две и больше составляющих.

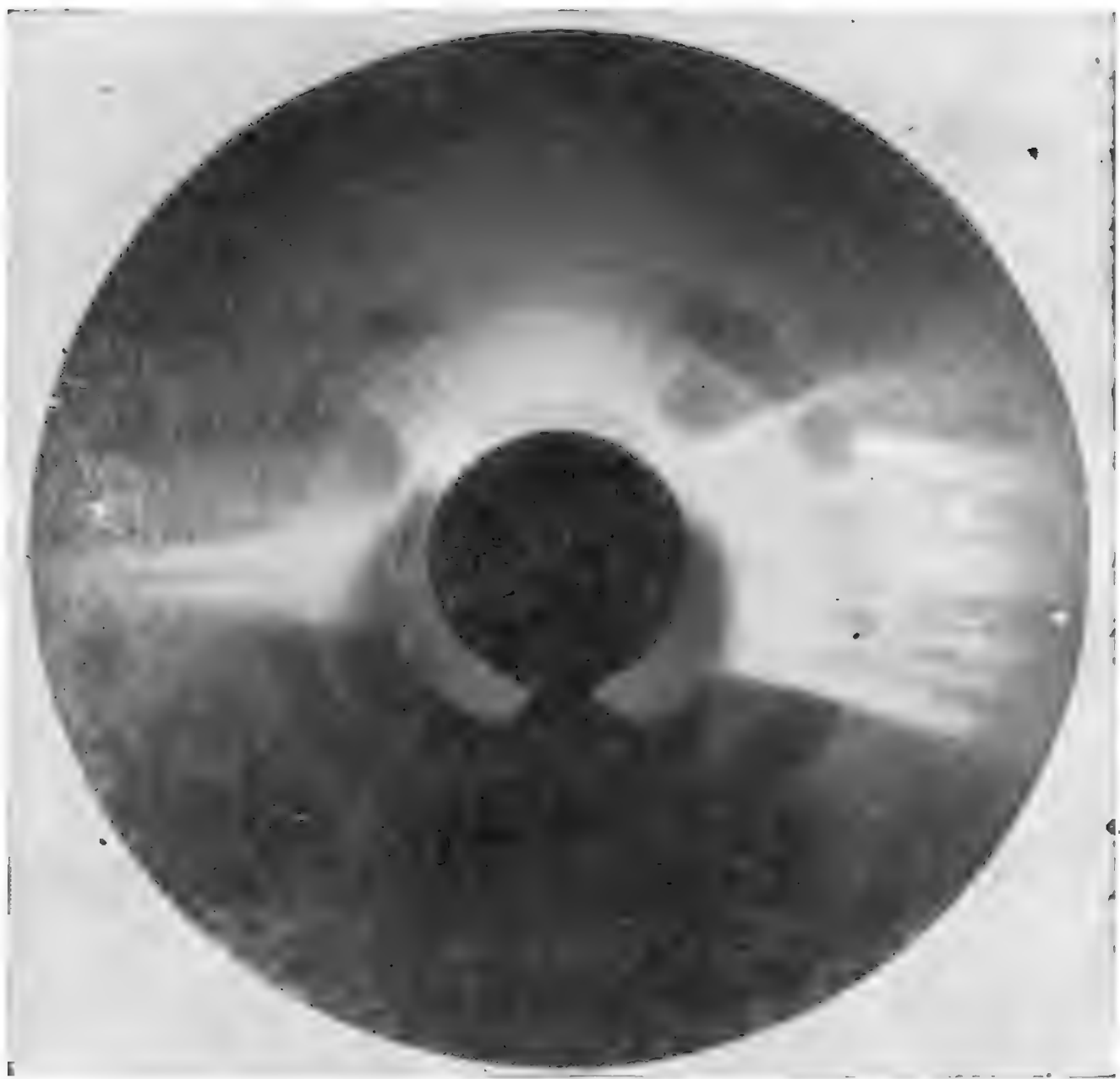
Астрономы, знавшие об этой работе, предположили, что уширение спектральных линий в пятне связано с эффектом Зеемана. Для подтверждения этого предположения нужен был телескоп с высоким разрешением, расположенный в хорошем с точки зрения качества изображения месте. В 1905 г. Хейл начал постройку такого телескопа на обсерватории Маунт-Вилсон в Калифорнии, и через 3 года он получил неопровержимые доказательства наличия в солнечном пятне сильных магнитных полей. Действительно, линии солнечных пятен оказались расщепленными на несколько линий, в точности так же, как у Зеемана в лаборатории. Излучение каждой из составляющих поляризовано. Поэтому при помощи соответствующих поляризационных фильтров можно выделить поляризованное излучение, связанное с наличием магнитного поля, на фоне общего солнечного излучения и определить напряженность магнитных полей в солнечных пятнах. В настоящее время на большинстве солнечных обсерваторий такая процедура является обычной и проводится ежедневно. Используя поляризационные свойства солнечных линий в магнитном поле, Бэбкоки в 1952 г. построили на обсерватории Маунт-Вилсон очень чувствительный магнитограф. Наблюдения магнитных полей дают возможность определить область сильных возмущений непосредственно под видимой поверхностью. Ведь под действием локальных возмущений магнитное поле может усиливаться до тех пор, пока силовые линии поля не выйдут на поверхность. Магнитограф регистрирует эти внезапные подъемы поля. Кроме того, он может регистрировать общее магнитное поле Солнца, меняющее свою полярность с периодом около 11 лет. Магнитограф также можно использовать для измерения магнитного поля на различных уровнях солнечной поверхности, в частности в протуберанцах и нижней короне.

Корона является самой внешней частью Солнца. Она видна только во время полного солнечного затмения, т. к. яркость света даже во внутренней короне в миллион раз меньше яркости света диска. Кроме того, свет от диска Солнца рассеивается атмосферой Земли, делающей свет неба чисто голубым, и яркость этого рассеянного света близка к яркости короны. Во время полного затмения Солнца яркий диск его закрывается Луной, и небо становится намного темнее. Тогда на короткое время нашим взорам предстает незабываемая картина: вокруг черного диска Луны мы видим огненный ореол.



Магнитная карта солнечного диска показывает местоположение, напряженность и направление слабых магнитных полей. Карта получена при помощи инструмента, в котором используется эффект Зеемана. (Хейловская обсерватория, США.)

Но солнечные затмения чрезвычайно редки и продолжаются всего несколько минут. Кроме того, многие из них происходят в удаленных местах Земли и, что еще хуже, во время пасмурной погоды. Все это дало мощный стимул для развития методов искусственного солнечного затмения и увенчалось в 1931 г. созданием французским астрономом Бернардом Лио внезатменного солнечного коронографа. Этот прекрасный прибор позволил исследователям Солнца изучать слабый свет внешней короны практически всегда. Лио не выдвинул при создании этого инструмента каких-либо существенно новых принципов. Он шел по пути, намеченному до него. Но терпение, внимание к деталям и удача — все это вместе взятое привело его к успеху.



В комплект инструментов на «Скайлэбе» входил коронограф. На этом снимке показаны корональные лучи и комета Когоутека за день до ее наибольшего сближения с Солнцем. (Высокогорная обсерватория, Боулдер, США.)

В основных чертах коронограф представляет собой два последовательных телескопа. Первый телескоп строит изображение Солнца, которое искусственно «затмевается» металлическим диском. Второй перебрасывает это изображение на фотопластинку или фотопленку. На первый взгляд все кажется несложным. Однако нужно проявить немалую изобретательность, чтобы исключить рассеянный свет в инструменте. Рассеянный свет от прямого пучка, вполне достаточный для быстрой засветки фотопластинок, уменьшается благодаря тому, что линзы объектива изготавливаются из одного тщательно отобранного куска стекла, не имеющего пузырьков, царапин, отпечатков пальцев — всего, что рассеивает свет. Для устранения паразитного света используются различные диафрагмы. Инструмент должен быть расположен на большой высоте, где атмосфера прозрачна. Лио построил свой первый коронограф на обсерватории Пик дю Миди в Пиренеях на высоте 2868 м.

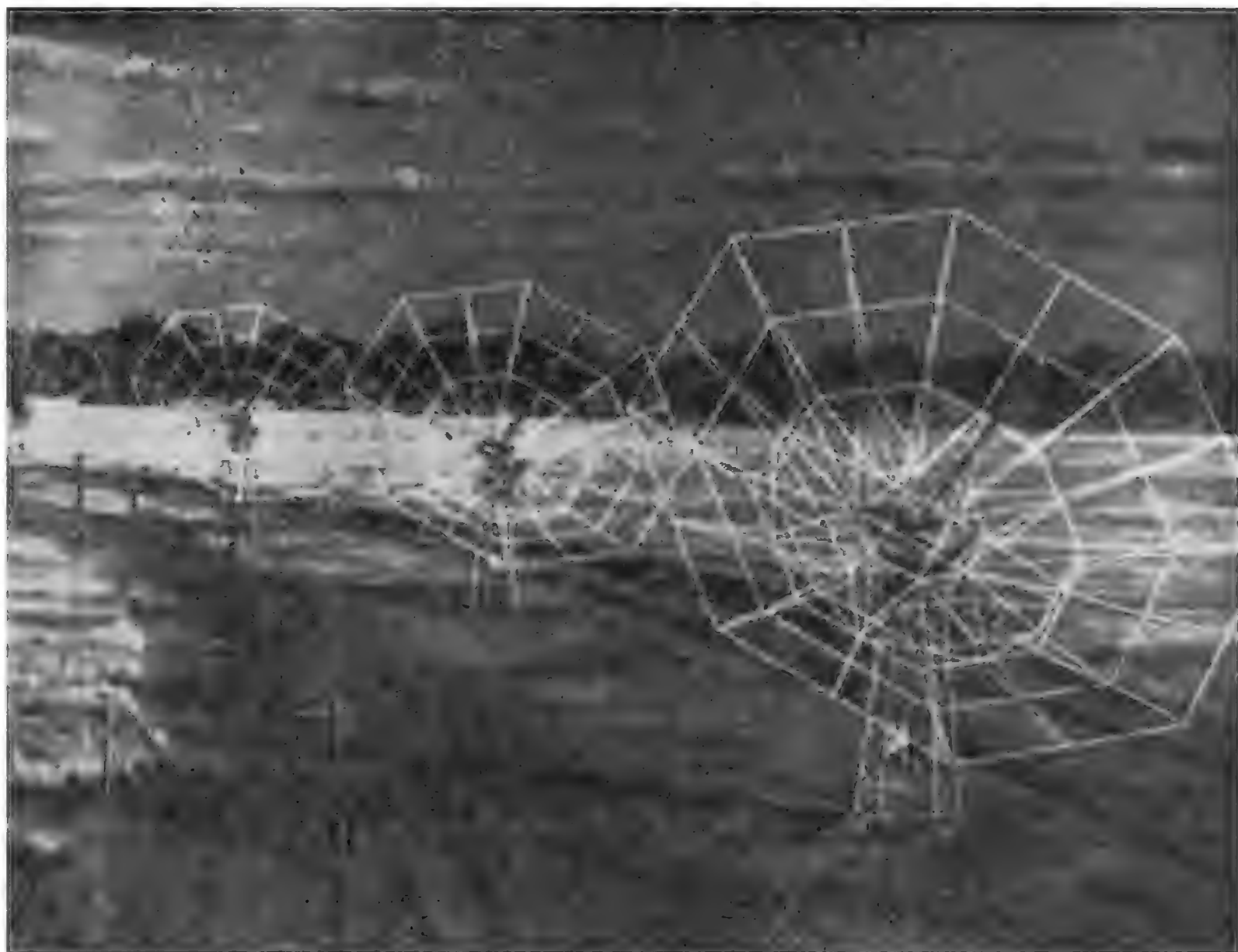
В комбинации со спектроскопом или фильтрами коронограф может быть использован для изучения поведения опре-

деленных атомов или элементов в короне. Вместе со спектрографом он дает возможность получить информацию о физических условиях в короне, в частности о температуре и плотности. Это последний оптический прибор, который я здесь описываю. Рассмотрим теперь коротко методы определения невидимой простому глазу радиации Солнца.

Солнце — один из основных источников радиоволн, приходящих из космического пространства. В большей части радиодиапазона оно является самым ярким объектом на небе; сравнимы с ним лишь остатки сверхновой (Тaurus A, Крабовидная туманность) и несколько радиогалактик (например, Лебедь A и Центавр A). Если в видимой области у Солнца нет соперников, то в радиоспектре первенство Солнца оспаривают удаленные, но чрезвычайно мощные объекты. Большинство радиоастрономических телескопов собирают радиоволны при помощи металлических чаш и сеток. Эти параболоидные чаши отражают и фокусируют излучение, которое затем детектируется и измеряется. На метровых и дециметровых волнах вместо отражающих параболоидов используются более сложные антенные системы.

Обычные радиоантенны не могут выделять структурные образования на Солнце. Ведь радиоволны в миллион раз длиннее световых. Это приводит к тому, что пространственное разрешение или способность выделить деталь структуры у них гораздо хуже по сравнению с оптическими телескопами. Чтобы получить большее разрешение, несколько антенных систем располагаются и соединяются соответствующим образом, образуя радиоинтерферометры. Для получения разрешающей силы, позволяющей выделять детали на Солнце, отдельные отражающие элементы необходимо располагать на расстоянии сотен длин волн. Например, пара параболоидов, разнесенных на 1 км и работающих на частоте 300 МГц (длина волны 1 м) может разрешить на Солнце детали размером в 3 угловые минуты, что соответствует примерно расстоянию в 150 000 км на поверхности Солнца. Легко понять, что карты, получаемые радиоастрономами, гораздо грубее, чем оптические фотографии высокого качества.

Наиболее известным радиотелескопом является австралийский радиогелиограф в Калгуре (Новый Южный Уэльс). Он состоит из 96 антенн, равномерно расположенных по кругу диаметром 3 км. Сигналы поступают на электронно-вычислительную машину, которая позволяет получать дважды в секунду радиоизображение Солнца. На основании таких радиокарт можно сделать кинофильм, демонстрирующий активность Солнца в радиодиапазоне.



Несколько элементов солнечного радиотелескопа в Калгуре (Новый Южный Уэльс, Австралия).

Для исследования Солнца чрезвычайно важен также прибор, называемый радиоспектрографом. Сопряженный с радиотелескопом, радиоспектрограф регистрирует радиоспектр в заданном интервале частот как функцию времени. Этот прибор очень полезен для исследования внезапных всплесков радиоизлучения.

Подлинную революцию в наблюдениях за Солнцем со времени создания галилеевского телескопа внесло использование космической технологии. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучения Солнца не могут проникать через атмосферу Земли, а они чрезвычайно важны, поскольку образуются в активных областях солнечной внешней атмосферы и приносят информацию о взрывных процессах на Солнце. Высокоэнергичное излучение может быть обнаружено только теми приборами, которые вынесены за пределы земной атмосферы при помощи баллонов, ракет и искусственных спутников Земли (ИСЗ). Астрономы уже в XVIII столетии поднимались на воздушных шарах, а в начале XX столетия использовали самолеты. Первые астрономические исследования рентгеновского излучения производились почти исключительно

при помощи ракет. Однако гораздо более обширные сведения получают сейчас при помощи искусственных спутников, непрерывно вращающихся вокруг Земли или Солнца. Кроме того, появилась уникальная возможность посылки космических зондов по орбитам, проходящим вблизи Солнца. Приборы, установленные на спутниках, позволяют непрерывно наблюдать Солнце, в то время как облака или наступление ночи прерывают наземные наблюдения.

Первые рентгеновские изображения Солнца были получены на ракетах. Впервые были обнаружены области сильного возмущения рентгена в солнечной короне.

Использование спутников расширило наши знания о Солнце. Так, например на космических кораблях типа IMP (Interplanetary Monitoring Platform) в конце шестидесятых годов были произведены сотни измерений потоков электронов, выбрасываемых Солнцем. Советские ученые проводили измерения рентгеновского и гамма-излучений на спутниках типа «Прогноз». Например, научное оборудование, установленное на «Прогнозе-2», запущенном в 1972 г., включало в себя спектрометры для измерения рентгена и гамма-лучей, а также детекторы для обнаружения электронов, протонов и нейтронов, испускаемых Солнцем.

Восемь космических кораблей типа OSO (Orbiting Solar Observatory — вращающиеся солнечные обсерватории) были оснащены рядом приборов. OSO-7, запущенный в конце 1971 г., функционировал в течение двух с половиной лет, что само по себе является замечательным достижением, поскольку спутник вскоре после запуска начал неконтролируемо вращаться вокруг своей оси и казался обреченным. Только при помощи новой системы солнечных датчиков и гиросистемы, не применяемых ранее ни на одном из прежних космических кораблей этого типа, удалось с Земли стабилизировать спутник. На борту OSO-7 находился коронограф белого света, затмевающий диск (искусственная луна) которого был укреплен на стержне перед телескопом. Ведь в вакууме космического пространства размещение маленького диска на небольшом расстоянии от телескопа достаточно для того, чтобы создать искусственное затмение и видеть корону! Кроме того, на спутнике был размещен гамма-спектрометр, спектрограф для рентгеновского и высокоэнергичного ультрафиолетового излучений и прибор для измерения рентгеновских потоков от Солнца. На OSO-7 были установлены также рентгеновские телескопы для изучения рентгена на других звездах. Каждые 90 минут эллиптическая орбита ИСЗ пересекала верхние слои земной атмосферы, и в результате возникающего при этом торможения OSO-7 в июле 1974 г.

упал в нижнюю атмосферу и сгорел. При помощи ИСЗ типа OSO Солнце наблюдалось в течение целого 11-летнего цикла активности.

Необычайно успешно были проведены солнечные исследования при помощи американской космической станции «Скайлэб», на борту которой был размещен солнечный телескоп Apollo. Это была первая астрономическая обсерватория в космическом пространстве с непосредственным участием людей. Восемь солнечных телескопов, размещенных на этой космической станции, управлялись с Земли или астронавтами. Шесть основных солнечных телескопов регистрировали и фотографировали внешнюю атмосферу Солнца в диапазоне длин волн от видимого света до рентгена. На фотографиях в рентгене была видна детальная структура Солнца до высот в 0,5 солнечного радиуса над солнечной поверхностью.

На «Скайлэбе» были установлены гораздо более совершенные приборы, чем на других ИСЗ. Размер «Скайлэба» позволил поставить большие и тяжелые инструменты. Площадь, отданная под научное оборудование, составляла 6 м², а вес телескопов достигал почти тонны. Система управления потребляла энергию, равную 2 кВт, в 100 раз меньше, чем ИСЗ типа OSO.

Важно также, что большое количество получаемых данных можно было быстро передавать на Землю — в среднем 600 фотоснимков в день. Более того, различного вида изображения Солнца могли передаваться на Землю одновременно — например, изображения в белом свете и ультрафиолете; это дало возможность ученым и астрономам эффективнее планировать наблюдения. Экипаж «Скайлэба», естественно, должен был вернуться на Землю. Это дало прекрасную возможность использовать при работе с некоторыми телескопами фотопленку. Даже при наличии электронной страны чудес на корабле обычная пленка обладает тем преимуществом, что она является идеальным хранителем информации. Изображение Солнца для передачи на Землю при помощи телевидения должно быть расщеплено на миллион частей. Пленка обеспечивает быстрое эффективное накопление и сохранение данных, которые не нужно оцифровывать и передавать на Землю. Астронавт может вынуть пленку из кассеты (для этого он должен покинуть корабль) и привезти ее обратно на Землю. Всего ученые использовали тридцать коробок пленки и получили 150 000 хороших кадров.

Другим важным фактором, обеспечившим успех миссии «Скайлэба», была поддержка со стороны Земли. Мировая сеть солнечных обсерваторий и станций использовалась

для независимого наблюдения за Солнцем с целью помочь исследователям на «Скайлэбе». Когда что-то неожиданное происходило на Солнце, это сразу же сообщалось на космический корабль. Ежедневно наземное руководство полетом вырабатывало программу на следующий день. Наконец, сами астронавты при необходимости играли решающую роль в ремонте космической станции и оборудования: освобождали заклинившиеся жалюзи, сменяли камеры, заряжали пленку и даже спасали саму космическую капсулу в начале полета после неудачного запуска. Стоимость всего солнечного эксперимента составила около 250 млн. долларов, однако затраты были с лихвой окуплены большим количеством новой информации о природе любимой звезды астрономов.

Стоит сделать еще одно замечание. За исключением радиотелескопов, большинство инструментов, применяемых в солнечных исследованиях, не может быть использовано для изучения других звезд, намного более удаленных от нас, чем Солнце. Самые близкие звезды находятся в миллион раз дальше. Мы не можем увидеть слабых ореолов вокруг других звезд, подобных солнечной короне во время солнечного затмения. Только на небольшом числе самых близких гигантских звезд можно смутно различить грубые детали поверхностной структуры. Даже самые крупные телескопы не могут разрешить диск размером в солнечный диаметр. Никакая другая звезда не исследуется с такой точностью, с какой проводятся обычные солнечные наблюдения. Дневная звезда, полная тайны, сообщает нам больше об обычных объектах Вселенной, чем это сможет сделать когда-нибудь любая ночная звезда.

4

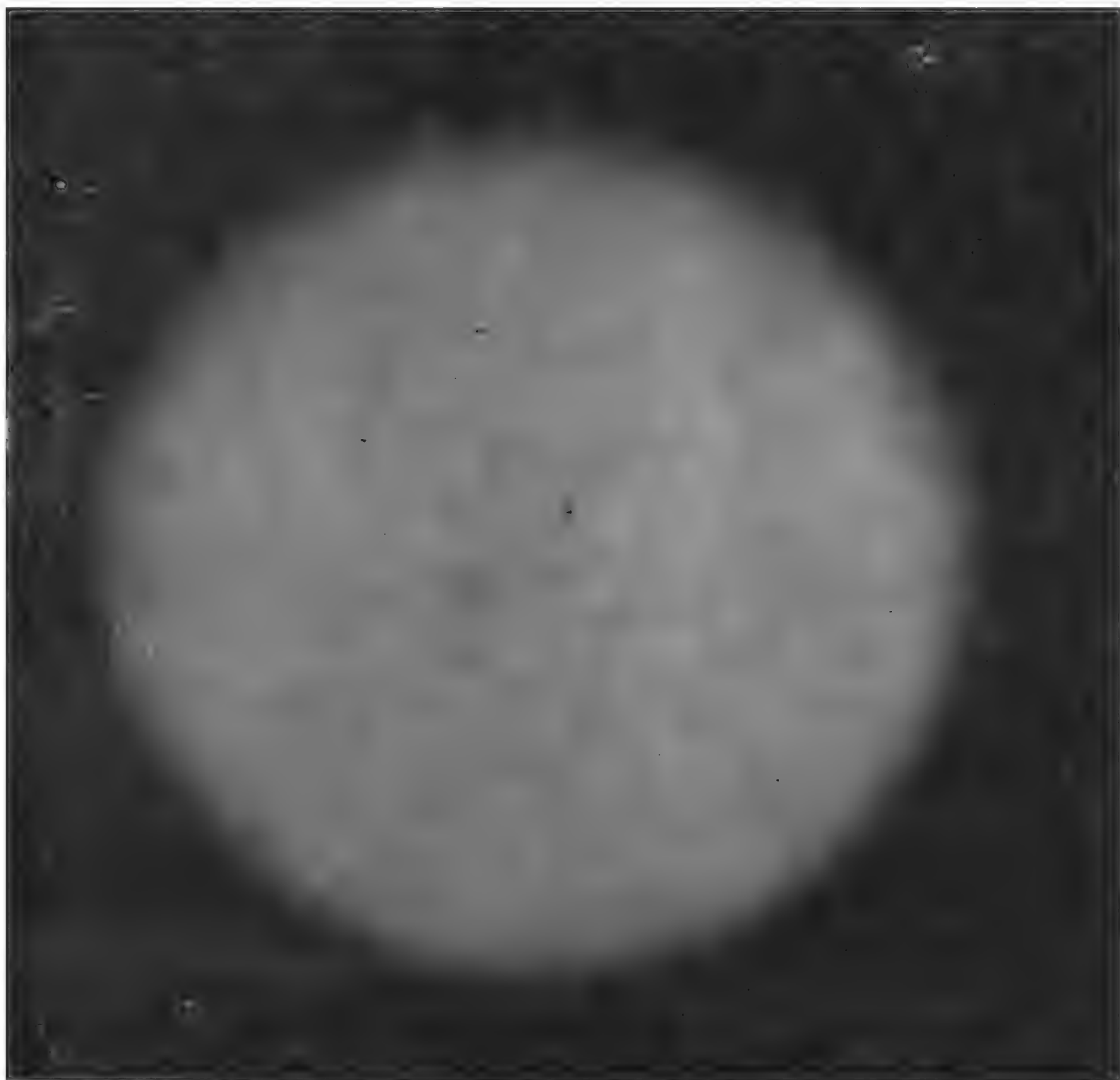
Архитектура Солнца

Если посмотреть на Солнце простым глазом, оно кажется ослепительно ярким идеальным желтым диском. На фотографиях Солнца, полученных в видимом свете, заметно, что на краю диска Солнце слегка темнее. Это явление называется потемнением к краю. Его можно объяснить следующим образом. Луч зрения проникает в центр видимого диска вертикально, проходя через газовую атмосферу Солнца. Когда мы смотрим на край, луч зрения проходит параллельно поверхности Солнца и пересекает только верхние слои раскаленного газа, несколько более холодные. Итак, свет, идущий от края Солнца, излучается более холодным газом и должен проходить через бóльшую толщу атмосферы, чем свет, идущий из центра диска. В этом и заключается объяснение потемнения к краю. Но что это говорит нам о структуре Солнца? Основной вывод, который можно сделать, заключается в том, что газы нижней атмосферы горячее газов верхней атмосферы. Конечно, вы можете подумать, что не такое уж это большое открытие. Однако эта небольшая информация об архитектуре Солнца могла быть сделана всего лишь на основе простого наблюдения.

Между прочим, некоторые звезды показывают уярчение к краю (они горячее на краю). Это значит, что изменение температуры с высотой у них противоположно солнечному. Еще более усложняют картину радиокарты нашего Солнца: радиояркость на краю Солнца выше. Это означает, что какая-то часть радиоизлучения генерируется во внешней атмосфере.

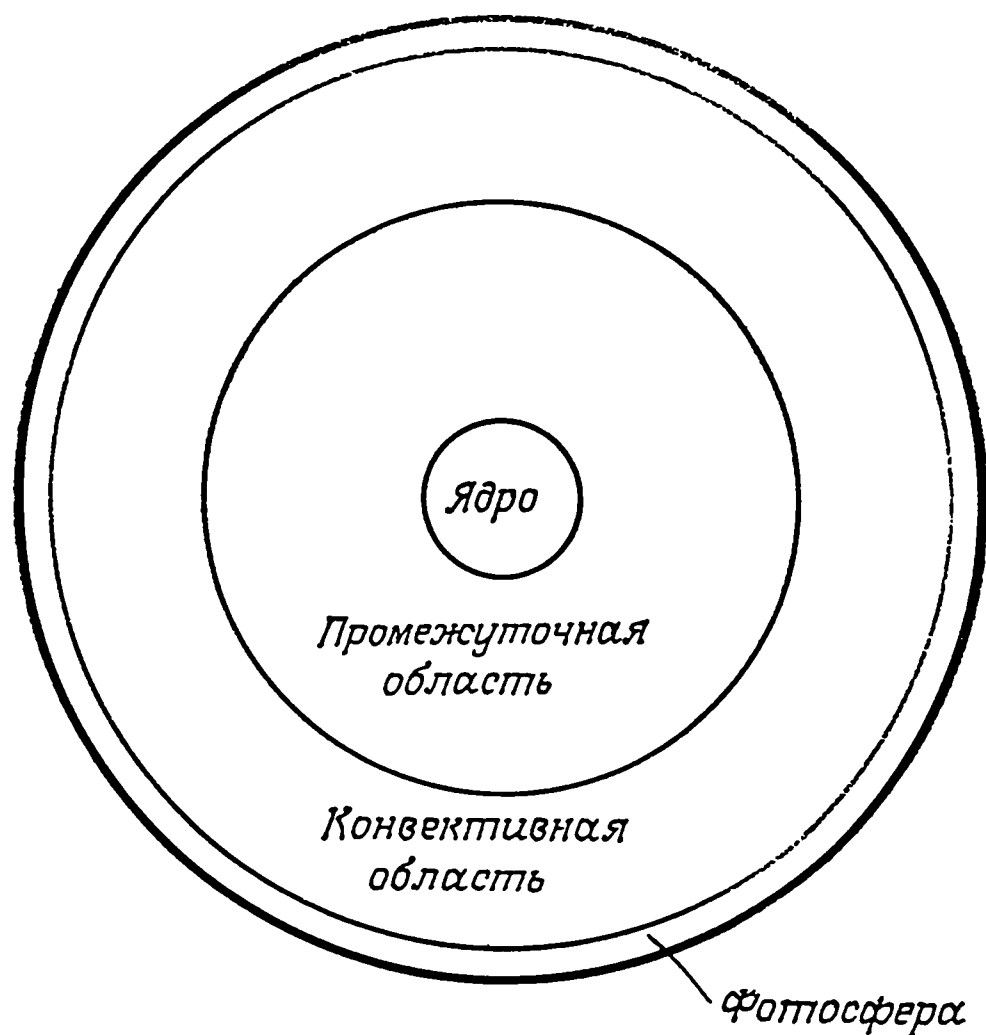
Для рассмотрения структуры Солнца я опишу воображаемое путешествие через центр Солнца к Земле — хотя такое путешествие и совершают все время световые частицы-фотоны, перенося свет и тепло.

Отправляясь в путешествие, зададимся вопросом, как мы узнаем температуру и плотность. Величины большинства физических параметров не измеряются, а рассчитываются теоретически. Структура внутренней части Солнца определяется путем размышления и расчета. Вот этапы этого пути: теория, написание уравнений, мощные вычислительные машины. И конечно, нужна еще удача. Известны обычно толь-



Диск Солнца 12 октября 1963 г. Хорошо заметны потемнение диска к краю и две группы солнечных пятен. (Королевское астрономическое общество, Лондон.)

ко некоторые глобальные характеристики, такие, как масса или радиус, а также физические условия на излучающей поверхности. В результате наблюдений других звезд мы знаем также взаимную зависимость некоторых параметров (например, поверхностной температуры и массы). Химический состав Солнца может быть определен, как мы увидим дальше, из спектроскопических данных. Теоретик должен на основании всех этих данных создать математическую модель Солнца. Если эта модель соответствует всем известным наблюдательным свойствам и продолжает соответствовать новым результатам, то можно считать ее довольно хорошим приближением к действительности. Такой метод используется в солнечной физике почти столетия. Сейчас мы имеем уже разумное глобальное представление о



Основные зоны внутри Солнца. Плотное ядро содержит половину массы Солнца и именно там выделяется термоядерная энергия.

структуре Солнца. Мы не можем теперь произвольно менять некоторые солнечные параметры, такие, например, как температура ядра, не оказывая существенного влияния на величину наблюдаемой яркости Солнца. Итак, начнем наше воображаемое путешествие из глубины Солнца, из области, которая пока может быть исследована только при помощи математики и вычислительной техники.

Центральная часть Солнца для краткости называется ядром. Внутри ядра вещество чрезвычайно сжато. Солнце находится в устойчивом состоянии под действием сил гравитации со стороны своего собственного вещества, и солнечное ядро сжато весом вышележающей материи. Хотя радиус ядра равен примерно одной четверти радиуса Солнца, а объем ядра поэтому составляет менее 2 % полного объема Солнца, почти половина солнечной массы упакована в нем. Слово «упаковано» хорошо соответствует действительности — ведь плотность внутри ядра равна 155 г/см^3 , она в 10 раз больше, чем плотность свинца. Внутреннее давление огромно, $\sim 3 \cdot 10^{11}$ атмосфер, а температура составляет 14—15 млн. градусов по Кельвину.

Условия точно такие, какие нужны для работы ядерного реактора. Ядро и представляет собой управляемую ядерную станцию, где водород превращается в гелий. Энергия, осво-



Солнечную атмосферу обычно рассматривают как состоящую из нескольких слоев. В действительности слои незаметно переходят друг в друга, и их фактическая протяженность меняется в зависимости от степени активности поверхности Солнца.

бождаемая в результате ядерных процессов, пересекает ядро в виде излучения.

Передвинувшись на $1/4$ радиуса Солнца, мы покидаем ядро и вступаем в конвективную зону, которая простирается вплоть до видимой поверхности Солнца. В этой зоне сосредоточена остальная половина массы Солнца. Здесь не происходит образования энергии, так как температура и давление вещества падают ниже значений, необходимых для работы ядерного реактора. Чем ближе мы к поверхности, тем меньше температура и давление. Другими словами, мы движемся вдоль направления градиента температуры и плотности. На расстоянии в $0,1$ солнечного радиуса под поверхностью Солнца температура приблизительно равна $600\,000\text{ К}$, а давление составляет всего 1 млн. атмосфер. Внутри конвективной зоны имеют место крупномасштабные движения вещества, в результате которых энергия переносится от ядра к поверхности.

На видимой поверхности Солнца, которую астрономы называют фотосферой, взгляд может проникнуть на довольно большое расстояние. Внутри Солнце совершенно непрозрачно (в противном случае мы могли бы видеть сквозь него). Поэтому наш воображаемый путешественник в центре Солнца может видеть всего лишь на расстоянии в 1 см от него в любую сторону. Фотосфера представляет собой переходный слой, в котором вещество охлаждается настолько, что становится прозрачным. Свет может покидать эту поверхность без особенных помех, и поэтому мы эту поверхность видим. Другой важный факт, который нужно отметить, состоит в том, что желтый диск Солнца имеет очень резкий край, а ведь от шара светящегося газа мы могли бы ожидать неясных очертаний. Резкость края связана с очень быстрым внезапным переходом от почти полной непрозрачности к высокой прозрачности. Видимый нами белый свет Солнца приходит главным образом от слоя, в котором имеет место такое

резкое изменение параметров. Толщина этого слоя около 500 км — меньше 0,1 % радиуса Солнца, поэтому край Солнца так резок. Сейчас нам становится понятнее явление потемнения к краю: ведь луч зрения, идущий к центру диска, проходит на 500 км глубже, и поэтому достигает более горячих и ярких слоев, чем луч зрения, направленный к краю диска.

На поверхности Солнца температура падает до примерно 6000 К, давление до 1/6 атмосферы, а плотность совсем до малой величины — она становится меньше, чем одна миллионная доля плотности обычной воды.

Двинемся дальше сквозь слои внешней атмосферы Солнца, напоминая луковичную шелуху. Над желто-белой фотосферой лежит относительно холодная область, называемая хромосферой. Она видна в течение нескольких секунд во время солнечного затмения как розовое кольцо вокруг диска Солнца. Между фотосферой и хромосферой нет определенной четкой границы. Если температура снизилась до примерно 4500 °К, то можно считать, что это уже хромосфера. Затем температура поднимается с высотой, достигая 10 000 °К в верхней хромосфере, а дальше резко возрастает до 1 млн. градусов на границе с короной, на высоте в несколько тысяч километров над фотосферой. Между тем плотность падает до 10^{-16} г/см³ (в 1 см³ содержится при этом 10 млн. атомов водорода).

Самый верхний слой атмосферы Солнца — корона, протягивающаяся по крайней мере на 10 солнечных радиусов. Внутри короны всюду температура составляет 10^6 К и выше. Вещество короны в видимом свете почти полностью прозрачно, и поэтому свет самой короны очень слаб. Из-за этого корону можно увидеть только во время полных солнечных затмений.

Корона является мощным источником рентгеновского излучения. При температуре около 10^6 К только тяжелые атомы, такие, как атомы железа, способны еще удерживать на орбитах часть своих электронов (да и то не больше одного или двух). Такие «ободренные» тяжелые атомы дают эмиссионные линии в рентгеновской области спектра. Атомы, способные снова захватить электроны на орбиту, также излучают рентген. Рентгеновское излучение возникает и при взаимодействии таких атомов друг с другом.

Выше короны наши воображаемые путешественники попадают в область солнечного ветра. Этот ветер образуется короной. И действительно, самая верхушка короны, удаленная на миллионы километров от поверхности Солнца, улетает в космическое пространство. Силы солнечной гравитации не хватает, чтобы удержать частицы на таком расстоянии.

Поэтому они испаряются в пространство и образуют ветер, состоящий из частиц. Начальная скорость ветра около 4000 км/с. Постепенно его скорость падает и позади нашей планеты равна 400 км/с. Не бойтесь, ветер, имеющий такую высокую скорость, не страшен, так как плотность его мала: в объеме чайной чашки будут находиться всего около 1000 частиц. В течение года Солнце из-за солнечного ветра теряет 200 миллионов миллионов тонн ($200 \cdot 10^{18}$ г), или 3×10^6 тонн в 1 сек. Величина несколько меняется в зависимости от состояния активности Солнца.

Открытие солнечного ветра было сделано раньше, чем начали летать ИСЗ типа ИМР. Самое удивительное, что обнаружение солнечного ветра явилось результатом астрономических наблюдений чрезвычайно удаленных радиисточников, расположенных на расстоянии миллиардов световых лет от солнечной системы. Эти источники были названы квазарами. В 1964 г. кембриджские радиоастрономы обнаружили, что, когда Солнце приближается к лучу зрения, направленному к далекому радиисточнику, возникает возмущение радиосигнала. Это явление, названное межпланетными сцинтилляциями, имеет примерно такую же физическую природу, как и мерцание звезд на ночном небе. Нерегулярности солнечного ветра — сгущения и разрежения на пути распространения радиоволн приводят к возмущениям их траектории и вызывают эффект «мерцания».

Открытие солнечного ветра привело к еще одному непредвиденному результату. Кембриджские исследователи построили специальный телескоп для исследования солнечного ветра и его влияния на излучение радиисточников. Через несколько месяцев работы при помощи этого прибора были открыты пульсары. Пульсары представляют собой быстро вращающиеся нейтронные звезды, «шары» ядерного вещества диаметром 10 км и массой, близкой массе Солнца. В течение десятилетий теоретики предсказывали их существование, но никто не знал, как их найти в холодных просторах безграничной Вселенной. Совсем случайно Солнце способствовало их открытию!

Планеты, движущиеся вокруг Солнца по своим эллиптическим орбитам, пересекают внешние слои атмосферы Солнца. Две планеты с сильными магнитными полями, а именно Земля и Юпитер, отклоняют прямой «натиск» потоков солнечного ветра благодаря своей магнитной полости, называемой магнитосферой. Наши воображаемые путешественники должны заметить изменения в магнитном поле вблизи Земли. Фронт ударной волны в солнечном ветре располагается непосредственно перед магнитным «буфером». Отметим, что



Слабое зодиакальное сияние — это солнечный свет, отраженный пылью, заполняющей Солнечную систему. Фотография получена экспедицией «Аполлона-17» на Луну; на ней виден конус света на фоне звездного неба. (НАСА и Мировой центр данных А, Гринбелт, США.)

путешествие от Солнца на этом участке пути уже нельзя считать только плодом воображения, так как люди на самом деле пересекли эту область на своем пути к Луне. Кроме того, магнитное окружение Земли исследовалось при помощи многих ИСЗ.

Вблизи орбиты Сатурна на расстоянии от Солнца в 1 миллиард км атмосфера Солнца уже неотличима от межпланетной среды, заполненной блуждающими сгущениями газа и пылинками. Кстати, межпланетная пыль является причиной прекрасного явления, связанного с Солнцем, а именно зодиакального света. Это явление называется также фальшивым восходом и выглядит как конус света на горизонте, видимый на западе вскоре после захода Солнца или на востоке перед самым восходом Солнца. Зодиакальный свет вызван рассеянием солнечного излучения на пылевых частицах межпланетного пространства. В темные безлунные ночи около $1/3$ полного света неба приходится на его долю. Я никогда не видел его по-настоящему в Англии, но в Австралии это явление произвело на меня большое впечатление. Зодиакальный свет часто хорошо виден в малоосвещенных местах американских южных штатов.

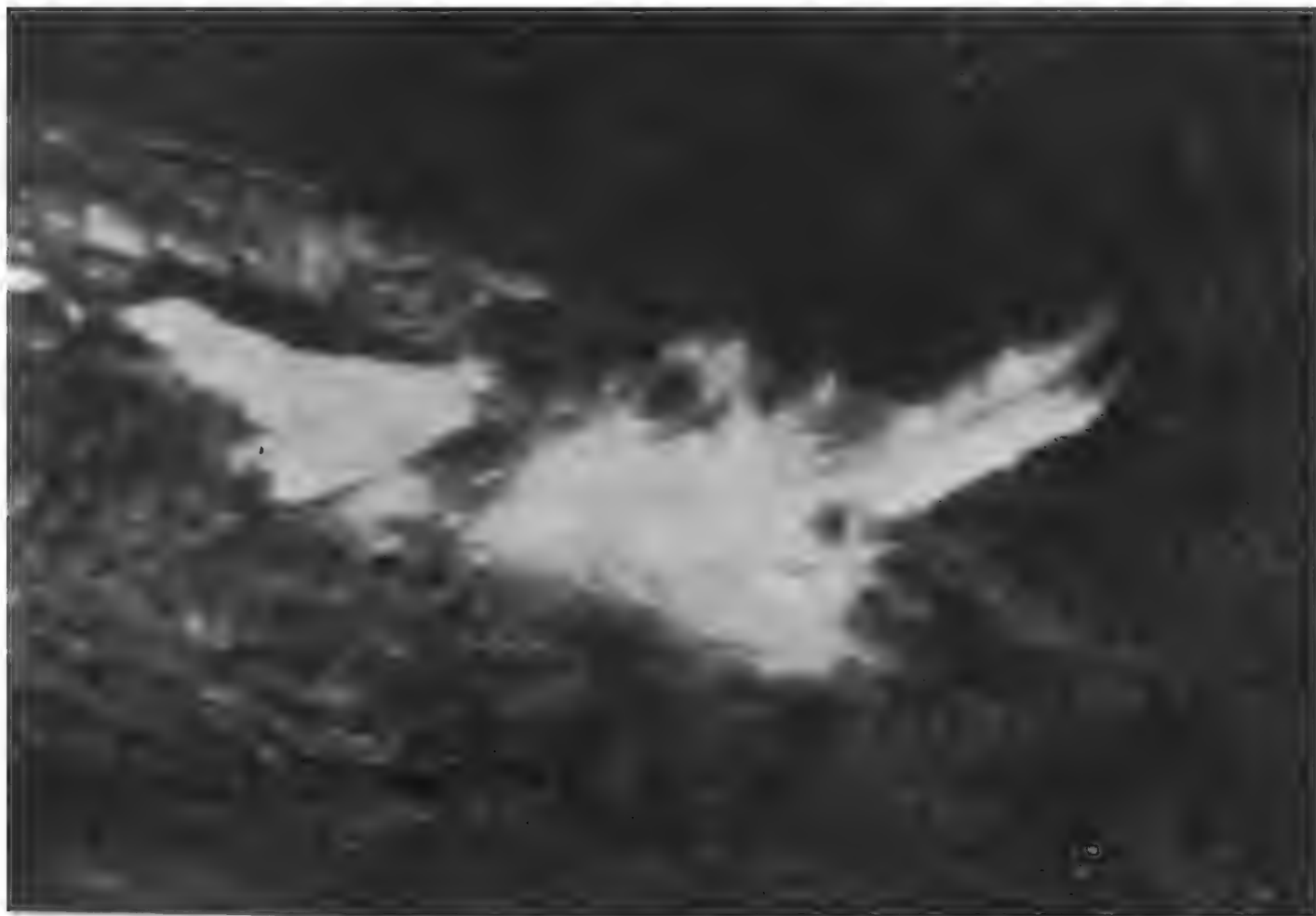
Покидая нашу солнечную систему, отметим, что Солнце похоже на многие другие звезды. Солнце является одной из многих звезд типа G2. Но, как показало наше воображаемое путешествие, Солнце — единственная звезда, которую мы способны разложить, говоря образно, по полочкам. Хотя мы и имеем представление о внутренних областях звезд, мы не можем достаточно подробно рассмотреть их поверхности, исследовать их короны, обнаруживать слабые звездные ветры и прослеживать день ото дня изменения их атмосфер. Конечно, в обрисованной нами картине много неясностей. Но ведь о других более далеких от нас звездах наши представления еще более неопределенны.

Тигель алхимика

Звезда является полем битвы двух сбалансированных сил. Все звезды представляют собой шары из газа, который удерживается от разлета силами гравитации. Откуда мы это знаем? То, что внешние слои атмосфер звезд, включая Солнце, состоят из газа, мы знаем вполне определенно из наблюдений. Недоступные же прямым наблюдениям внешние области звезд настолько горячи, что они не могут быть ничем иным кроме газа, или, более точно, плазмы.

Каждая частица внутри Солнца испытывает действие гравитационной силы со стороны других частиц. Гравитация, в отличие от магнитных сил, всегда притягивает тела друг к другу. Поэтому Солнце все время сжато под действием своей собственной гравитации. Эта сила препятствует Солнцу рассеяться в космическом пространстве. Небольшой расчет показывает, что эта сила очень эффективна. При температуре поверхности в 6000 К тепловая скорость отдельных атомов составляет около 10 км/с. Если «отключить» гравитацию, эти частицы в течение дня пролетят расстояние, равное 1 радиусу Солнца. Следовательно, всего за день размер Солнца увеличился бы вдвое. Короче говоря, за несколько недель без гравитации оно бы полностью рассеялось в пространстве. Без гравитации не было бы звезд, Солнца, не было бы нас! Однако эта сила должна быть чем-то уравновешена. Если бы гравитация была единственной силой на Солнце, все вещество устремилось бы с катастрофической скоростью внутрь, ведь время свободного падения для Солнца составляет примерно полчаса. Что же это за волшебная сила, препятствующая такому процессу?

Эта сила — внутреннее давление газа. Когда шар сжимают, газовое давление внутри него восстанавливает его прежнюю форму. Газовое давление также поддерживает атмосферу Земли. Если говорить строже, то сила, уравновешивающая гравитацию, — это градиент газового давления. Наблюдения показывают, что звезды, в частности Солнце, чрезвычайно устойчивы на протяжении миллионов лет, и это приводит нас к выводу, что любая небольшая часть Солнца находится в устойчивом равновесии вследствие идеального



Энергия взрыва в фотосфере выбрасывает вещество протуберанцев в космическое пространство. Фотография, подобная приведенной, позволяет нам наглядно представить себе, что творится на поверхности нашего светила. Столь бурно выделяющаяся на поверхности энергия зарождается глубоко в недрах и выносится наверх. (Обсерватория Сакраменто-Пик, США.)

баланса сжимающей силы гравитации и отталкивающей силы градиента давления. Давление в центре Солнца, составляющее миллиарды атмосфер, может быть грубо оценено путем расчета веса столба газа, вытянутого от центра Солнца до фотосферы.

В соответствии с физическими газовыми законами давление и температура фиксированной массы газа связаны между собой. При давлении в центре Солнца порядка $2,5 \cdot 10^{11}$ атмосфер температура должна составлять около 10 млн. градусов. Более точные расчеты дают значение в 14—16 млн. градусов.

Установив тот факт, что Солнце находится в идеальном равновесии, необходимо ответить на следующий важный вопрос. Известно, что горячая поверхность Солнца излучает энергию в количестве $3,83 \cdot 10^{26}$ Вт/с. Как компенсируются эти непрерывные потери? Без возмещения этих энергетических потерь Солнце неизбежно должно остыть и сжаться. Однако мы знаем, что на самом деле в течение 5 миллиардов лет поток энергии от Солнца почти не менялся.

Еще недавно астрономы совсем не понимали физической природы деятельности Солнца. У меня есть книга,

опубликованная в 1892 г., в которой так объясняется энергетика Солнца: «Солнце является самым мощным очагом, дающим тепло и свет, какой только можно себе представить». Далее в этой книге говорится, что, по мнению астрономов, у Солнца под сверкающей поверхностью твердое и даже холодное ядро.

Одна из первых серьезных попыток объяснить энергетику Солнца была сделана в 1842 г. В этом году Майер предположил, что энергия Солнца пополняется падающими метеоритами. Однако вскоре было показано, что такой энергии Солнцу хватит ненадолго.

В качестве альтернативы лорд Кельвин (Уильям Томсон) и Герман фон Гельмгольц выдвинули гравитационную теорию, согласно которой ежегодное сокращение размера Солнца на 20 м могло бы дать энергию, достаточную для компенсации потерь на излучение. Такое слабое сжатие, измерить которое невозможно и в наши дни, могло бы поддерживать жизнь Солнца на протяжении 50 млн. лет. Этот срок при тогдешнем состоянии геологических знаний о времени существования Земли казался вполне достаточным. Однако в начале двадцатого столетия было показано, что возраст окаменелостей и осадочных пород превышает сотни млн. лет, и необходим более эффективный механизм, нежели простое горение, для поддержания излучения Солнца. (Только после экспедиции на Луну стало ясным, что возраст Земли и Луны составляет 4,7 миллиарда лет, а Солнца — 5,6 миллиарда лет.)

Астрономы были поставлены в тупик перед проблемой объяснения продолжительности жизни Солнца, вытекающей из геологических данных. Спасителем явился сэр Джеймс Джинс. В 1920 г. он высказал предположение, что необходимая для жизнедеятельности Солнца энергия возникает за счет радиоактивности. Хотя в настоящее время эта гипотеза считается неверной, она заставила других ученых думать в правильном направлении, а именно рассматривать в качестве источника энергии Солнца и других звезд энергию, возникающую при превращениях атомов. Радиоактивность — это процесс, при котором ядра атомов распадаются обычно с излучением других частиц, но выделяющаяся при этом процессе энергия мала. Джинс предположил, что источником является энергия распада сверхатомов, которые, как он думал, могли остаться со времени ранней стадии развития Вселенной.

Однако гипотеза Джинса оказалась несостоятельной. Весьма поучительно рассмотреть причины этого. Основной вопрос заключается в следующем. Если энергия поставляется радиоактивным распадом, почему Солнце так устойчиво?

Мы уже отмечали строго равновесное состояние внутри Солнца; причиной его является идеальный баланс сил гравитации и градиента давления. Такой баланс невозможен при радиоактивном нагреве, так как процесс радиоактивного распада является спонтанным, зависящим только от самих ядер атомов, и поэтому не подвержен влиянию внешних условий, таких, как температура и давление. Короче говоря, у радиоактивных звезд, если бы они существовали, нет способов управления температурой и процессом выделения энергии. Такие звезды неизменно взрывались бы при сжатии или расширении, как атомные бомбы. Необходимо, чтобы источник энергии помогал звезде остаться устойчивой. Источник энергии должен работать интенсивнее при небольшом сжатии звезды; это приведет к выделению дополнительного тепла и увеличению препятствующего сжатию давления. Тот же самый источник должен работать менее эффективно при небольшом расширении звезды, тем самым уменьшая давление. Для устойчивости звезды нужно, чтобы источник энергии работал подобно предохранительному клапану.

В 1931 г. британский астроном Аткинсон предположил, что источником энергии Солнца может быть процесс захвата лишних протонов ядрами атомов. Протон — это тяжелая ядерная частица, несущая положительный электрический заряд. Атом водорода состоит из тяжелого центрального протона и вращающегося электрона. Совместно протон и электрон делают атом электрически нейтральным.

В этом месте нашего повествования мы увидим, как исследование излучения Солнца помогло общему развитию физики за последние пятьдесят лет. Следуя идее Аткинсона, американский астроном Дональд Мензел указал, что из-за высокого относительного содержания протонов (ядер водорода) внутри звезд процесс взаимодействия протонов может быть важным источником энергии Солнца. Слияние протонов, в результате которого возникает более тяжелое ядро, происходит с выделением ядерной энергии. Однако в начале 30-х годов ученые считали, что взаимодействия протонов с выделением энергии (так называемые термоядерные реакции) не могут осуществляться, поскольку из-за одинаковых по знаку (положительных) зарядов протоны слишком сильно отталкиваются друг от друга. Гамов показал, что это простое возражение ошибочно для странного мира атомных частиц. Используя новую область науки — квантовую механику, занимающуюся взаимодействием частиц в микромире, Гамов доказал, что протоны могут проникать друг в друга. Они могут приблизиться настолько, что их слияние произойдет

до того, как эта электрическая сила «осознает» происходящее!

В 1939 г. работой Гамова воспользовались Ганс Бёте в США и Карл фон Вайцзекер в Германии. Они независимо друг от друга разработали первые возможные схемы выделения ядерной энергии внутри Солнца. Их выводы были, естественно, основаны на тогдашних достижениях ядерной физики. Их схема включала взаимодействие протонов с ядрами углерода. Мы знаем теперь, что реакции с участием ядер углерода важны только для звезд, масса которых больше массы Солнца. Сейчас считают, что для Солнца важны более простые реакции с участием в основном протонов. Однако, прежде чем приступить к рассказу об этих чудесах природы, познакомимся немного с самым знаменитым уравнением физики.

Для этого нам нужно сделать короткий экскурс в удивительный мир теории относительности Эйнштейна, одно из соотношений которой имеет вид $E = mc^2$. Это уравнение говорит нам, что энергия E и масса m — взаимозаменяемые величины. Множитель c^2 представляет собой значение квадрата скорости света и является очень большой величиной. Приведем пример: 1 г вещества энергетически эквивалентен 30 млн. кВт-часов. Этот пример показывает, что вся масса m в принципе может быть превращена в энергию. Хотя полный переход массы в энергию и может происходить для некоторых фундаментальных частиц, для обычного вещества этот процесс совсем не так эффективен. Как мы увидим, на Солнце меньше 1 % массы может переходить в излучение.

Основной процесс, приводящий к выделению энергии внутри Солнца, заключается в образовании из четырех протонов одного атома гелия. При этой термоядерной реакции теряется 0,7 % массы протонов, поскольку суммарная масса образующегося ядра гелия и нескольких других частиц несколько меньше массы участвующих в цикле ядерных реакций четырех протонов. Дефицит массы проявляется в виде излучения, другими словами, энергии. Вначале последовательность реакций превращения водорода в гелий кажется чрезвычайно маловероятной. Однако поскольку Солнце существует, то эти реакции должны иметь место!

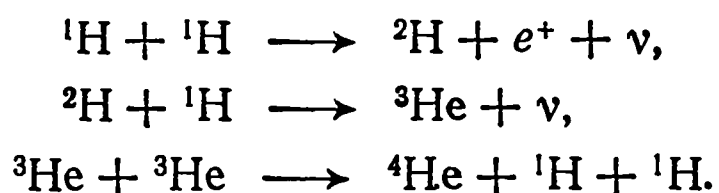
В цепочке протон-протонных реакций первое событие состоит в соединении двух протонов и образовании ядра тяжелого водорода, или дейтерия. При этом возникает также положительно заряженный электрон — позитрон. Ведь дейтрон является результатом слияния протона и нейтрона, и поэтому один из участвующих в реакции протонов должен быть превращен в нейтрон. Два маловероятных события

предшествуют появлению дейтрона внутри Солнца. Во-первых, один из протонов должен иметь скорость в 5 раз больше средней; только тогда из-за своей высокой энергии он может подойти достаточно близко к другому протону, несмотря на отталкивание электрическим полем этого протона. Внутри Солнца распределение скоростей частиц таково, что только один протон из сотни миллионов имеет скорость, в 5 раз превышающую среднюю. Во-вторых, во время столкновения протонов, которое продолжается 10^{-21} с, один из протонов должен превратиться в нейтрон. Маловероятно, не правда ли? Конечно, чрезвычайно маловероятно для каждого заданного наперед протона. Если выбрать какой-нибудь определенный протон, то можно ожидать, что такой цирковой трюк он сможет совершить лишь после десятков миллиардов лет тренировки. Если бы такие события не были маловероятны, то Солнце мгновенно бы взорвалось. Однако внутри Солнца так много протонов, что каждую секунду в таком маловероятном процессе участвуют $3 \cdot 10^{38}$ протонов. Комбинация низкой вероятности события и огромного числа возможных участников — протонов — приводит к довольно значительной скорости взаимодействия.

От таких слившихся без особого желания пар протонов рождаются дейтроны. В отличие от родительских частиц они легко соединяются с другими частицами. В течение всего нескольких секунд типичный дейтрон захватывает дополнительный протон. При этом образуется новая комбинация — ядро гелия-3 (^3He). У него три возможные судьбы. Сам он эту судьбу не выбирает, она определяется законами теории вероятности. Наиболее вероятное событие (95 %) — его объединение с таким же ядром. Это событие приводит к конечному результату всей цепочки реакций, а именно к образованию ядра гелия-4 (^4He), называемого α -частицей, и двух протонов. Альфа-частица является ядром обычного атома гелия.

До рассмотрения двух других возможных ветвей цепочки, приводящих к выделению энергии, несколько подробнее остановимся на основной рассмотренной нами выше реакции. Сначала напомним ее в короткой форме, принятой в ядерной физике. Эту запись легко понять. В принятых символах ^1H обозначает протон, ^2H — дейтрон, ^3He — легкий гелий, ^4He — обычную форму гелия, состоящего из двух протонов и двух нейтронов, e^+ — позитрон, или положительно заряженный электрон, ν — нейтрино — предсказанную ранее, до ее экспериментального открытия, частицу без заряда и массы, очень редко взаимодействующую с веществом, и наконец, γ — фотон, или электромагнитную энергию (рентгеновские

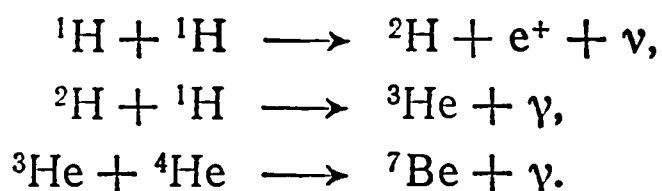
лучи, световое излучение, радиоволны и т. д.). Тогда описанные выше реакции запишутся так:



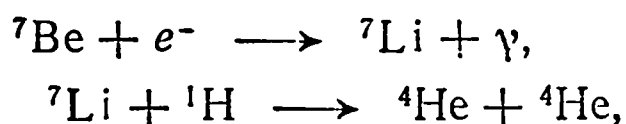
Исходные частицы написаны слева от стрелки, а продукты реакции — справа от нее. В результате этой ветви протон-протонной цепочки из шести протонов получаются одна α -частица (${}^4\text{He}$), два протона, один позитрон, одно нейтрино (см. гл. 6) и некоторое количество энергии.

Сравним массу этих шести исходных протонов с массой конечных продуктов реакции. Расчет показывает, что теряется около 0,7 % массы 4 протонов, превращаемых в результате в ядро ${}^4\text{He}$. При таком процессе каждый килограмм водорода теряет массу в 7 г, которая превращается в энергию, равную $6 \cdot 10^{14}$ Дж, или примерно в 200 млн. кВт-ч. Такое количество энергии значительно превышает возможности химических реакций и гораздо больше того количества тепла, которое выделилось бы при непрерывном сжатии Солнца, согласно гипотезе Кельвина и Гельмгольца. На Солнце в начале его существования было столько водорода, что это могло обеспечить сохранение современного уровня солнечного излучения в течение 10 000 млн. лет. К настоящему времени исчерпана лишь половина этих запасов.

Вернемся теперь к другим возможным ветвям протон-протонной цепочки. Частица ${}^3\text{He}$ после своего образования не обязательно сталкивается с такой же частицей, она может столкнуться, хотя и с меньшей вероятностью (около 5 %), с ядром ${}^4\text{He}$ и образовать бериллий-7 (${}^7\text{Be}$). Последовательность реакций будет такой:

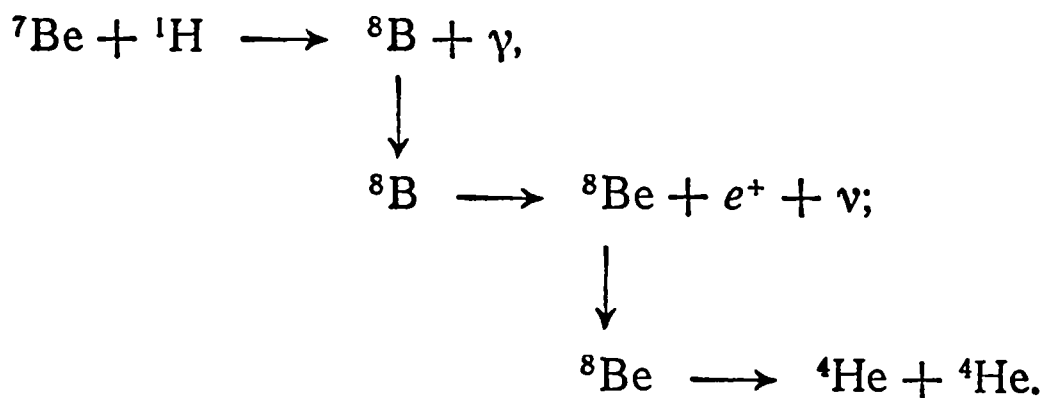


После этого есть два пути: или бериллий-7 захватит электрон e^-



или бериллий-7 захватит протон, превратясь в бор-8 (${}^8\text{B}$), который, будучи неустойчивым, сразу же распадется на бериллий-8 (${}^8\text{Be}$), а тот, в свою очередь, распадется на две

частицы ${}^4\text{He}$:



Таким образом, мы проследили три возможных пути слияния протонов, приводящих к образованию ядер обычных атомов гелия. Вероятность каждого пути можно рассчитать. В случае Солнца почти вся энергия (95 %) генерируется в результате осуществления первой из трех возможных последовательностей реакций.

Имеет смысл подчеркнуть здесь, что теория генерации термоядерной энергии (т. е. получения энергии в результате уничтожения вещества) была предложена и развита для Солнца раньше, чем появилась возможность проведения управляемых термоядерных экспериментов в лабораторных условиях. Только начиная с середины 70-х годов стало возможным воссоздать в лаборатории температуры и давления, присущие солнечному ядру. Это можно сделать на короткое время путем фокусировки чрезвычайно мощного пучка лазера на капельке тяжелой воды, сжимающейся до 10^{12} атмосфер при попадании в обжигающий лазерный пучок. Тяжелая вода, которую получают из обычной воды, содержит тяжелый изотоп водорода — дейтерий. Используют именно дейтерий. так как вследствие малой вероятности протон-протонной реакции она ни разу не воспроизводилась в лаборатории, хотя, как мы знаем, она идет на Солнце. Как уже отмечалось, такая реакция в естественных условиях возникает лишь при наличии огромного количества водорода внутри звезд. Поэтому для получения ядерной энергии в лаборатории нужно начинать не с водорода, а с дейтерия.

Процесс освобождения ядерной энергии в звездах сильно зависит от значений температуры и давления в центре Солнца. По величине излучения поверхности Солнца мы можем определить количество выделяющейся энергии в солнечном ядре. Каждую секунду Солнце «потребляет» около 655 млн. тонн водорода, который превращается в 650 млн. тонн гелия. В самом начале своего существования масса водорода составляла немного более 70 % массы Солнца. Каждую секунду этот запас уменьшается на 5 млн. тонн. В результате жизнь Солнца может длиться еще только 5000 млн. лет: наша дневная звезда уже средних лет.

Мы слишком хорошо знаем, что при термоядерной реакции на Земле происходит гигантский взрыв (взрывается водородная бомба). Если бы удалось воспроизвести чудо Солнца в малых масштабах, то можно было бы построить термоядерные станции с водородом в качестве топлива. Но до сих пор эта задача не поддается решению. Возникает вопрос: если освобождение ядерной энергии настолько иллюзорно, то почему звезды все-таки существуют? Почему Солнце не взрывается как бомба?

На самом деле Солнце удивительно устойчиво. Оно почти не изменилось за последние несколько миллиардов лет и уж совсем не похоже на бомбу. Солнце укрощает свой ядерный ураган следующим образом.

Ядерные процессы в таком большом реакторе, как звезда, сами себя стабилизируют. Так, представим себе, что в результате какого-то возмущения Солнце немного расширилось. Это воображаемое расширение привело бы к падению температуры и давления в центре Солнца. Тогда ядерные частицы не смогли бы двигаться так быстро и так сильно соударяться. Следовательно, соединялось бы меньшее число частиц. Выделение ядерной энергии происходило бы с несколько меньшей скоростью. Это уменьшение в свою очередь понизило бы температуру и, что самое важное, уменьшило бы направленный наружу градиент давления. Таким образом, последствия первоначального возмущения автоматически ослабляются описанным процессом. Подобным же образом слабое сжатие подняло бы температуру и скорость ядерных реакций настолько, чтобы воспрепятствовать дальнейшему сжатию. В течение большей части своей жизни и жизни человечества наше Солнце находится в идеальном балансе между излучаемой энергией и энергией, выделяющейся в центральных частях Солнца. Любое кратковременное уменьшение выделения энергии быстро сводится на нет небольшим сжатием Солнца, увеличивающим давление в солнечном ядре.

Важным вспомогательным фактором устойчивости Солнца, о котором мы немного говорили раньше, является чрезвычайная непрозрачность солнечного вещества к излучению. Условия в солнечном ядре таковы, что квант излучения (фотон) может пройти всего 1 см до столкновения с частицей вещества. Такие частые столкновения приводят к тому, что излучение становится почти ненаправленным, фотоны блуждают бесцельно, пока случайно не достигнут фотосферы. Там же температура такова, что вещество внезапно становится прозрачным к видимому излучению, которое затем устремляется со скоростью света к Земле и остальной холодной Вселенной. Примерно 10 млн. лет солнечная энергия просачи-

вается от ядра Солнца к его поверхности. Если бы Солнце вдруг стало прозрачным, то все излучение без задержки устремилось бы наружу, не образовав стабилизирующего градиента давления. Солнце стало бы космической бомбой.

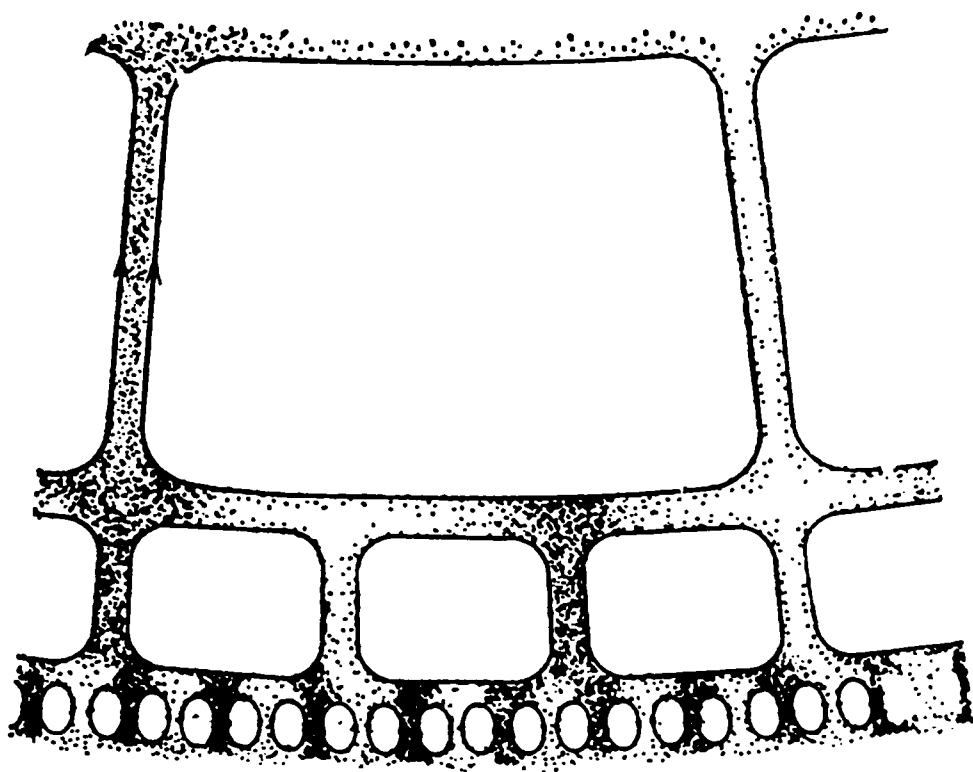
Первый шаг в процессе освобождения солнечной энергии состоит в объединении двух протонов для образования дейтрона. В солнечных условиях это событие имеет малую вероятность, однако оно происходит достаточно часто для того, чтобы поддерживать излучение Солнца. Если бы не было стабилизирующих факторов, несомненно, появилась бы взрывная ситуация. Сразу же после начала взрыва температура и давление в центре Солнца резко бы возросли. Подъем температуры привел бы к росту скорости протонов, к увеличению частоты столкновений и слияний и, следовательно, к увеличению скорости выделения энергии. Короче говоря, произошел бы взрыв, похожий на взрыв бомбы. Этот процесс на самом деле имеет место в конце жизни звезд, более массивных, чем Солнце.

Сейчас мы достигли той стадии, на которой я хочу более тщательно рассмотреть способы переноса энергии от центра Солнца к его поверхности. В элементарной физике рассматриваются три возможных механизма переноса энергии: теплопроводность, конвекция и излучение. Первый процесс важен только в твердых телах и не играет существенной роли для звезд и Солнца. Конвекция представляет собой перенос тепла путем движений масс нагретого вещества, в то время как излучение непосредственно переносит энергию со скоростью света посредством электромагнитных волн (радиоволны, свет, рентгеновские лучи и т. д.).

Фотоны, освобождающиеся при ядерных реакциях в центре Солнца, являются высокоэнергичными гамма-лучами. Они прокладывают себе путь вперед через бесчисленные столкновения с электронами и ядрами. Этот столкновительный процесс увеличивает число фотонов и одновременно уменьшает их среднюю энергию при диффузии из ядра: сначала возникает рентген и крайний ультрафиолет, затем ультрафиолет и, наконец, видимый свет. На протяжении сотен тысяч километров излучение является основным способом переноса энергии на Солнце. Конвекция начинает преобладать только на подступах к фотосфере. То, что конвекция отсутствует внутри или вблизи ядра, имеет весьма важные последствия: конечные продукты ядерного сгорания не перемешиваются с веществом самых верхних слоев Солнца. Поэтому солнечная атмосфера, которую мы можем наблюдать непосредственно, не загрязнена отходами ядерных реакций, происходящих в центре Солнца, а имеет все еще такой же состав, как

и молодое Солнце 5 млрд. лет тому назад. Это дает нам важный источник информации о химическом составе Солнца на ранних стадиях его развития.

Когда фотоны приближаются к последней части пути путешествия к поверхности Солнца, в недрах Солнца наступают важные перемены. Давление, температура и плотность уменьшаются от ядра к фотосфере. При приближении к фотосфере они изменяются так сильно, что возникает конвекция. Совершая наше воображаемое путешествие от ядра, мы, наконец, встречаемся с атомными ядрами, температура,



Иерархия конвективных ячеек на Солнце. Как и большинство схем, иллюстрирующих строение Солнца, эта схема тоже условна, хотя и не совсем точна.

а следовательно, и тепловая скорость которых уменьшились настолько, что они оказались способными частично заполнить свои орбиты электронами. Такие только частично заполненные атомы называются ионами. Эти ионы оказывают сильное влияние на перенос излучения, спектр которого между тем переместился из области гамма-лучей в ультрафиолетовую область. Ультрафиолетовые фотоны легко могут быть поглощены солнечными ионами (высокоэнергичные гамма-лучи, если бы они все еще существовали, просто разбились бы ионы на части). Внезапно фотоны начинают поглощаться основной массой солнечного вещества, а не перебрасываться, как раньше, от одного ядра к другому. Другими словами, в этой области Солнца вещество становится полностью непрозрачным. Энергия оказалась захваченной веществом.

Вещество в ответ на такой приток энергии начинает яростно бурлить. Ситуация становится локально неустойчи-

вой; непрозрачное вещество, не пропускающее излучения, стремится подняться к более холодным слоям атмосферы Солнца, что приводит к возникновению турбулентной конвекции. Конвекция является очень эффективным способом переноса энергии внутри звезд, и поэтому наши фотоны последнюю часть пути к фотосфере проходят очень быстро. Конвективная зона возникает на глубине около 150 000 км и тянется до фотосферы. Как уже отмечалось, фотосфера — переходная область, в которой Солнце становится чрезвычайно прозрачным в видимой области спектра. В форме видимого излучения большая часть энергии покидает Солнце.

Теоретики полагают, что конвективная зона состоит, по-видимому, из трех слоев конвективных ячеек. Глубже всего образуются гигантские ячейки диаметром в 150 000 км каждая. Выше расположен промежуточный слой ячеек, несущих энергию к бурлящей фотосфере. Еще выше лежит слой малых ячеек диаметром в несколько тысяч км и толщиной около 1500 км, достигающий поверхности. Верхушки этого слоя и представляют собой видимую поверхность Солнца. Наконец-то фотоны могут беспрепятственно (или почти беспрепятственно) начать свое путешествие в космическое пространство, которое для большинства из них длится целую вечность. Только одна миллиардная (10^{-9}) часть этих фотонов придет на Землю.

На фотографиях, полученных при помощи телескопов в периоды хорошего качества изображения, видна тонкая «кратчатая» структура солнечной поверхности. Эта структура связана с конвективными ячейками и называется грануляцией. Некоторые из таких фотографий высокого качества получены при помощи телескопов, поднятых на большие высоты воздушными шарами (баллонами). Бурлящая поверхность Солнца непрерывно меняется по мере того, как образуются и исчезают отдельные гранулы, живущие всего несколько минут. Измерения скорости в грануле показали, что в ярком центре гранулы вещество движется вверх, а на темной границе гранулы, где температура меньше, движение направлено вниз.

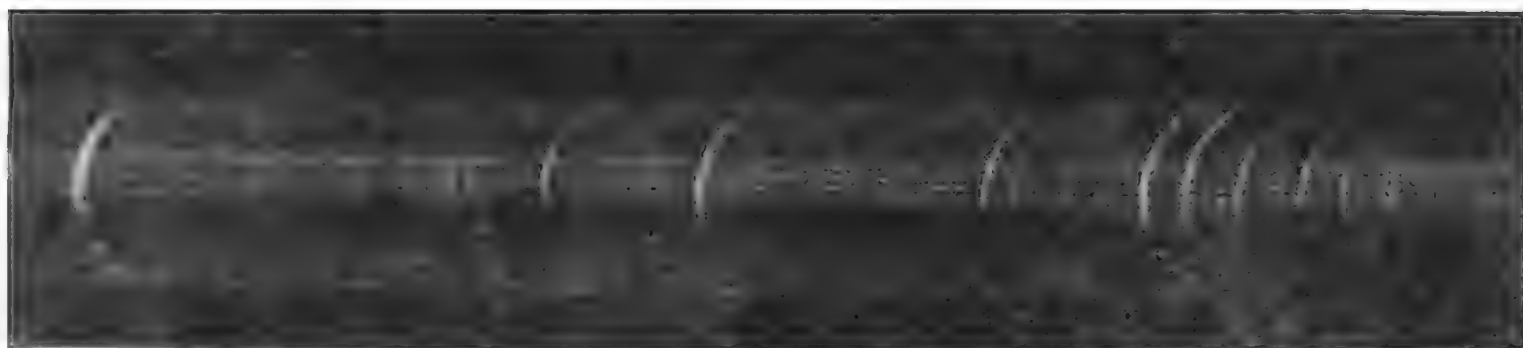
В то время как конвекция сильно возбуждает фотосферу, важные физические процессы происходят в хромосфере. Бурлящая фотосфера возбуждает хромосферную активность. Толчки снизу приводят к возникновению волн давления, или звуковых волн, пересекающих хромосферу. При своем прохождении через хромосферу волны нагревают вещество, увеличивая скорость атомов. Звуковые волны частично поглощаются в хромосфере. Этим поглощением механической энергии в некоторой степени и объясняется резкий подъем температуры хромосферы от 4500 К до 10^6 К. Основание хро-



Раскаленная поверхность Солнца с ячейками грануляции. Последние представляют собой «пузырьки» в фотосфере — слое, постоянно находящемся в движении. Каждый такой «пузырек» — размером с Британские острова. (Обсерватория им. Хэла, США.)

мосферы представляет собой самую холодную область внешних слоев Солнца. Внутри хромосферы при подъеме на 2 м температура увеличивается на 1° . Кроме звуковых волн свою энергию передают хромосфере магнитогидродинамические и гравитационные волны, также возбуждаемые в фотосфере.

На границе хромосферы и короны температура достигает 10^6 К. Внутри короны температура лежит в интервале (1—



«Спектр вспышки» хромосферы, снятый во время полного солнечного затмения. Яркие изогнутые дугой линии — это линии излучения хромосферы. Они соответствуют линиям поглощения во фраунгоферовском спектре фотосферы. Только во время затмений мы можем наблюдать этот свет, переизлученный атомами, ответственными за поглощение. Американский астроном Ч. Юнг открыл этот «обращенный» спектр хромосферы во время затмения 1870 г., наблюдавшегося в Испании. (Хейловская обсерватория, США.)



На этом снимке изображена верхняя хромосфера, снятая в свете, испускаемом атомами ионизованного кальция. Белые области — это районы повышенной солнечной активности. Тонкие темные «щетинки» — спикулы. Они очерчивают сетку ячеек супергрануляции, каждая из которых имеет в поперечнике до 30 000 км. (Б. Джилсли, Национальная обсерватория Китт-Пик, США.)

2) $\cdot 10^6$ К; корона является самой горячей областью атмосферы Солнца. Она — мощный источник рентгеновской эмиссии, однако очень слабо излучает в видимой области спектра. Гравитационное поле не может надежно удерживать го-

рячую корону; самый верхний слой короны истекает в космическое пространство, образуя солнечный ветер.

Солнечный ветер исследуется космическими зондами. Несомненно, он движется в основном за счет энергии, выкачиваемой из конвективных областей Солнца. Выйдя из Солнца,



Солнечная корона, снятая при помощи коронографа «Скайлэба». Выброс вещества из активной области проходит через всю корону и объединяется с солнечным ветром, истекающим из короны. (Высокогорная обсерватория, Боулдер, США.)

частицы, унося с собой небольшую часть потока солнечной энергии, могут пересечь межпланетное пространство.

Проведенное нами исследование потока солнечной энергии от ядерной «печи» в центре Солнца до холодной Вселенной потребовало весьма существенных знаний об архитектуре Солнца, структуре его различных слоев, в частности о распределении температуры и плотности, а также полного представления о силах, приводящих к устойчивости Солнца. Стоит еще раз подчеркнуть, что Солнце — это единственная звезда, ряд физических характеристик которой можно измерить. Так, астрономы не могут обнаружить потоки частиц

звездных ветров даже от ближайших звезд. Звездные короны в настоящее время обнаруживаются при помощи рентгеновских телескопов. Возможность исследования энергетических источников звезд вообще, а пекулярных звезд в частности, появилась только после того, как были обнаружены источники солнечной энергии, а именно ядерные реакции. Поэтому представляется законным вопрос, насколько уверенными могут быть астрономы в правильности нарисованной здесь картины? В весьма высокой степени, отвечают астрономы, однако ни один ученый не может быть настолько наивен, чтобы настаивать на абсолютной достоверности наших знаний о таком сложном объекте, как Солнце. Как мы увидим в следующей главе, до сих пор существуют некоторые сомнения относительно достоверности наших моделей внутренних слоев Солнца.

Загадка солнечных нейтрино

Ученые обычно строят модели, являющиеся упрощенным описанием определенного физического процесса. Инженер часто изучает поведение масштабных моделей, которые представляют собой миниатюрный вариант реального предмета. Для моделирования сложных структур или механизмов инженер применяет вычислительную машину. Астрономы не могут построить масштабные модели: их модели Вселенной, галактик и звезд чисто теоретические и всегда останутся такими из-за громадных размеров изучаемых объектов. Научные модели имеют несколько назначений. Чтобы модель можно было считать хорошей, она должна адекватно объяснять явление, для описания которого создана. Возьмем для примера законы всемирного тяготения. Законы Ньютона достаточно точно объясняют физические процессы повседневной жизни, например падение яблока или колебания маятника. Однако они не дают достаточно удовлетворительного объяснения движению орбиты планеты Меркурий в солнечном гравитационном поле. Для объяснения этого явления необходима более сложная модель — общая теория относительности Эйнштейна. Эта теория может объяснить эффект постоянного вращения орбиты Меркурия, обычно называемый поворотом перигелия Меркурия. Но даже теория Эйнштейна не дает полного объяснения поведению таких гравитационных объектов, как черные дыры.

Неудовлетворительность старой модели часто приводит к созданию более усовершенствованной теории. Так, теория Ньютона последовала за моделью Кеплера, теория Эйнштейна сменила теорию Ньютона; так оно будет продолжаться и дальше. Следовательно, неспособность прежней модели объяснить какое-либо новое явление может направить научный поиск по совершенно новому и плодотворному пути.

Совсем недавно считали, что обширная область астрофизической теории, а именно теория структуры и эволюции Солнца и звезд, полностью построена. Казалось, что математические модели дают совершенно ясное объяснение процессов, происходящих на звездах. Правда, всегда оставался вопрос: можно ли быть уверенным, что модели хорошо отражают действительные физические процессы, если сами эти

процессы, происходящие в глубине Солнца, нельзя непосредственно наблюдать?

В случае Солнца важно помнить, что его теперешнее излучение несет информацию об условиях, существовавших в ядерном реакторе Солнца миллионы лет тому назад. Ведь именно тогда родились фотоны, которые сейчас падают на наши тела и на входную апертуру наших телескопов. Однако существует ядерная частица, предсказанная теоретически в 1931 г., которая может рассказать о сегодняшнем состоянии внутренних областей Солнца.

На заре развития ядерной физики Вольфганг Паули, размышляя над процессом радиоактивного распада, пришел к выводу, что для соблюдения законов сохранения — законов, согласно которым определенные физические величины не могут быть ни созданы, ни разрушены в процессе радиоактивного распада, — кроме электронов должна выделяться еще одна частица. Тем самым он постулировал существование новой субатомной частицы, названной впоследствии нейтрино (уменьшительное от «нейтрон»). О ней мы вкратце упоминали в главе 4. Эта частица субатомного мира замечательна тем, что не имеет электрического заряда, масса покоя ее ничтожна или равна нулю, а скорость движения равна скорости света. Нейтрино обладают необыкновенной проникающей способностью, они почти не взаимодействуют с обычным веществом. Бесчисленные миллионы нейтрино проходят через нас каждую секунду. Даже слой свинца толщиной от Земли до Плутона мало повлияет на величину нейтринного потока. По этой причине только через четверть столетия после предсказания Паули нейтрино были надежно обнаружены в одном из экспериментов.

Солнце выделяет огромное количество нейтрино, так как внутри Солнца при реакциях термоядерного синтеза при образовании одного нового ядра гелия (α -частицы) появляются два нейтрино (гл. 5). Каждую секунду на Солнце образуются $2 \cdot 10^{38}$ нейтрино. Что с ними происходит дальше? Поскольку взаимодействие нейтрино с веществом имеет очень малую вероятность, все они улетают из Солнца. Даже плотное вещество солнечного ядра не может остановить их продвижения. Любопытная ситуация, не правда ли: электромагнитная энергия, генерируемая в центре Солнца, излучается Солнцем только спустя миллионы лет, в то время как нейтрино улетают со скоростью света почти беспрепятственно! На Земле, которая является малой мишенью для таких расстояний, поток нейтрино через площадку в 10 см^2 (размер большой почтовой марки) составляет 10^{13} с^{-1} . А мы совер-



Нейтринный телескоп Брукхевенской национальной лаборатории управляется Раймондом Дэвисом. Основная часть телескопа, детектор, — это резервуар, содержащий почти полмиллиона литров тщательно обезвоженной и очищенной жидкости. Чтобы защитить резервуар от потока космических лучей, он размещен глубоко под землей, в шахте для добычи золота в Южной Дакоте (США). Резервуар расположен в пещере, специально вырубленной шахтерами. (Брукхевенская национальная лаборатория, США.)

шенно не замечаем, что нас непрерывно пересекает такой огромный поток безобидных частиц.

Если бы можно было построить прибор, измеряющий поток нейтрино (нейтринный детектор), то мы смогли бы узнать, что происходит в центре Солнца в настоящее время. Ученые могли бы сопоставить предсказания солнечных моделей с реальными измерениями. Такой прибор построил американский физикохимик Раймонд Дэвис.

Дэвис не ставил перед собой задачу изучения Солнца. Он работал над другой проблемой, на первый взгляд совершенно не связанной с астрономией. Ранее было высказано предположение о существовании двух типов нейтрино: нейтрино и антинейтрино, которое является своеобразным антиподом первого. Хотя наш обычный мир полностью состоит из вещества, в микромире есть вещество и антивещество. При столкновениях частицы со своей античастицей обе частицы исчезают, превращаясь в энергию (вспомните уравнение $E = mc^2$!). Так вот, Дэвис хотел найти способ различить нейтрино и антинейтрино. Идея эксперимента была предложена Бруно Понтекорво, который тогда, в 1947 г., работал в ядерной лаборатории Чалк Ривер в Канаде. Понтекорво

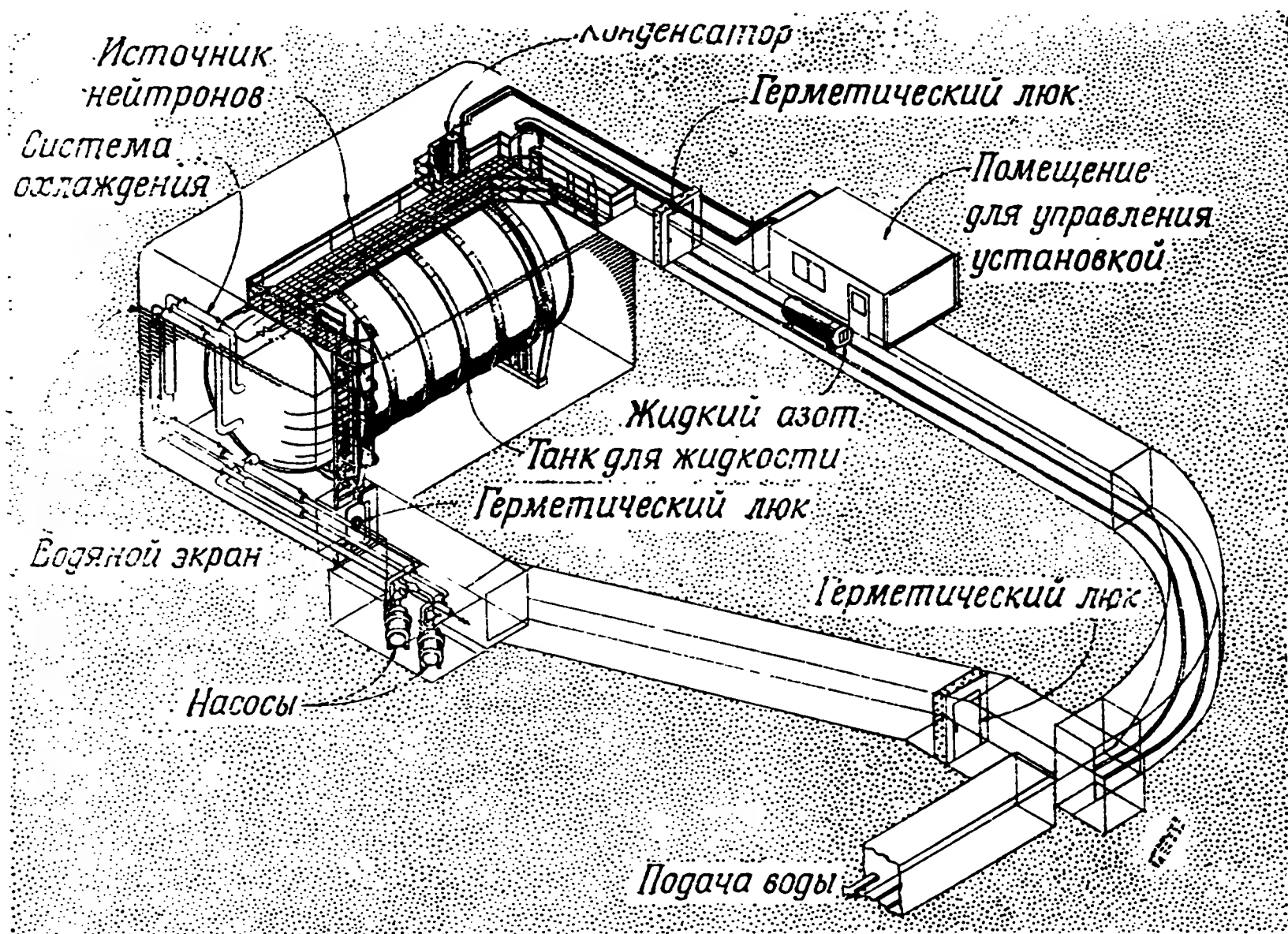
предложил использовать в качестве ловушки для нейтрино атомы хлора-37. Дело в том, что если атом хлора-37 сумеет захватить нейтрино определенной энергии, то он превратится в атом аргона-37; при этом происходит также выброс электрона. Антинейтрино же хлором-37 не поглощаются. Следовательно, если хлор-37 превратится частично в аргон-37, это будет означать, что имеет место поток нейтрино. Первые опыты Дэвиса проводились рядом с ядерным реактором, излучающим огромное число нейтрино.

Для проведения эксперимента необходимо измерить количество аргона-37, возникающего в результате распада хлора-37. Аргон-37 превращается обратно в хлор-37 в среднем за время, равное 35 дням, причем этот процесс сопровождается излучением электрона строго фиксированной энергии. Обнаружение электронов с такой энергией и дает возможность определить количество аргона-37. Для успеха всей этой детективной работы нужно, чтобы возникло по крайней мере 10 атомов аргона.

В своем пионерском эксперименте 1955 г. Дэвис использовал 15 000 литров четыреххлористого углерода (тетрахлорметан), потому что эта прозрачная жидкость богата хлором-37. Через несколько дней был обнаружен аргон-37. Таким образом, Дэвис обнаружил нейтрино, испускаемое реакторами, и одновременно установил грубую верхнюю границу потока нейтрино от Солнца.

Усовершенствование основной схемы в результате привело к созданию детектора солнечного нейтрино, в десятки тысяч раз более чувствительного, чем вначале. Солнечный нейтринный телескоп в современном виде представляет собой резервуар, наполненный тетрахлорметаном, объемом 450 кубометров, что близко к объему обычного 25-м плавательного бассейна. И все это предназначено для обнаружения ничтожного количества аргона-37. Детектор должен быть защищен от космических лучей, которые могли бы также различными способами образовать аргон-37. Поэтому детектор расположен под поверхностью Земли на глубине больше 1,5 км на дне старой шахты Южной Дакоты. Такое необычное расположение астрономического телескопа вызвало сенсацию как в кругах профессиональных астрономов, так и среди обычной публики.

Прибор Дэвиса не может обнаружить любые солнечные нейтрино. Только нейтрино, образующиеся при распаде бора-8 (^8B), имеют энергию, необходимую для превращения хлора-37 в аргон-37. Другие солнечные нейтрино неэффективны. Как отмечалось в главе 5, распад бора имеет место в третьей из трех возможных ветвей протон-протонного цик-



Общая схема солнечно-нейтринного телескопа в шахте золотого рудника Хоумстейк. Аппаратура расположена на глубине 1500 м. (Брукхевенская национальная лаборатория, США.)

ла. Мы подходим здесь к очень важному месту: именно в этой ветви в противоположность двум другим скорость образования нейтрино очень сильно зависит от температуры (примерно, как T^{13}). Следовательно, измерение потока солнечного нейтрино дает возможность определить температуру самых глубоких слоев Солнца. В свою очередь определение этой температуры обеспечивает важную и независимую проверку теоретических моделей процессов, происходящих на Солнце.

В течение многих лет Дэвис и теоретики играли в игру, которую можно назвать интеллектуальной чехардой. Всякий раз, как Дэвис улучшал чувствительность своего телескопа, теоретики производили пересмотр ожидаемого потока солнечного нейтрино, все время уменьшая его. Число обнаруженных нейтрино намного меньше предсказанных теоретиками, хотя возможные ошибки измерений не превышают 10 %. Общепринятая модель процессов внутри Солнца дает поток нейтрино в 10 больший, чем наблюдаемый. Поэтому теоретики делают попытки несколько видоизменить солнечные модели, чтобы привести их к лучшему согласию с опытами Дэвиса.

Одну из попыток объяснить противоречие между теорией и экспериментом предприняли Эзер и Камерон. Если предположить, что по какой-то причине когда-либо в прошлом вещество внешних слоев Солнца было перемешано с веществом внутреннего ядра, то это приведет к необходимости пересмотра относительного содержания элементов в солнечном ядерном реакторе. Такое перемешивание могло принести в ядро свежие запасы гелия-3, что привело бы к немедленному дополнительному выделению энергии в солнечном реакторе. Это привело бы к расширению ядра и вследствие этого к падению температуры. А при уменьшении температуры поток нейтрино катастрофически уменьшается. Такое перемешивание Солнца, по оценкам теоретиков, могло происходить периодически примерно каждые 100 млн. лет. После каждого такого перемешивания в течение 10 млн. лет температура ядра и поток нейтрино будут меньше нормы.

Гипотеза Эзера — Камерона — это только один из примеров того, как некоторая модификация общепринятой модели может изменить величину потока нейтрино. Похожая идея, например, состоит в предположении о быстром вращении солнечного ядра, приводящем к перемешиванию. Было даже выдвинуто совсем неожиданное предположение, что у Солнца есть небольшая черная дыра в центре, но солнечные физики не принимают эту идею всерьез.

Как бы ни оценивать солнечный нейтринный эксперимент, проблема остается. Дэвис, по-видимому, не обнаружил какие-либо солнечные нейтрино, а все разумные модели солнечного ядра предсказывают поток хотя бы в несколько нейтрино. Более того, общепринятые модели звезд дают поток нейтрино, который легко было бы обнаружить при помощи телескопа. Возникает вопрос: означает ли это, что Солнце не совсем обычная звезда? Или на Солнце происходит очень длительный процесс перемешивания?

Результат нейтринного эксперимента имеет важное значение для нашего понимания вариаций земного климата. Отсутствие нейтрино может означать, что температура в центре Солнца и солнечная светимость в настоящее время меньше нормального уровня. Вполне возможно, что понижение температуры Солнца приводит к возникновению длительных ледниковых периодов, обычно наступающих с интервалом в 200—300 млн. лет. Если такая интерпретация результатов Дэвиса верна, то Земля в настоящее время переживает ледниковый период. И если на Земле сейчас относительно тепло, то это только потому, что мы живем в относительно коротком (длительность которого 200 000 лет) межледниковом интервале.

7

Эволюция нашего Солнца

Если бы Солнце было единственной звездой на небе, мы вряд ли смогли бы много узнать о его рождении, жизни и будущей смерти. Только наблюдения за многими звездами позволяют астрономам выяснить в общих чертах историю жизни звезд вообще и Солнца в частности. Вот так и в лесу: ни один ботаник не может сидеть и наблюдать, как дерево возникает из семени, как оно превращается в молодое деревце, потом в большое густое дерево и наконец умирает. Это невозможно хотя бы потому, что дерево живет дольше, чем сам ботаник! Однако наблюдения за деревьями различных возрастов и пород дают достаточный материал для выяснения жизненного цикла деревьев.

То же самое и со звездами: астрофизики за последние 50 лет научились различать молодые звезды, многочисленные звезды среднего возраста (к ним принадлежит и Солнце) и звезды в конечной стадии их эволюции. В этой главе мы дадим краткое описание прошлой и будущей истории нашего Солнца.

Начнем с установления возрастов Солнца, нашей Галактики и Вселенной для того, чтобы зафиксировать временную шкалу истории. Возраст Солнечной системы определяется по возрасту самых древних веществ, которые оказываются в нашем распоряжении. На поверхности Земли нет такого первичного вещества. Дрейф континентов, погода, океаны и ледниковые периоды настолько трансформировали поверхностные горные породы, что они уже не содержат какой-либо информации о возрасте планеты. Важнее, однако, то, что Земля оставалась неразделенной на твердую земную кору, мантию и жидкое ядро в течение многих сотен миллионов лет после своего образования. Поэтому информацию о происхождении Солнечной системы нужно искать где-нибудь в другом месте, например в метеоритах и на Луне.

Специалисты по планетам пришли к выводу, что метеориты являются осколками горных пород, сохранившимися со времен ранней истории Солнечной системы. Очевидно, они образовались почти сразу после Солнца. При этом в состав некоторых метеоритов вошло небольшое количество радиоактивных элементов. В течение всей последующей истории эти радиоактивные вещества распадались, некоторые быстро,

другие чрезвычайно медленно, в результате количество первичных радиоактивных веществ уменьшилось, но образовались продукты их распада. Метеорит — это космические часы с постепенно раскручивающимся заводом. Выбрав определенный радиоактивный элемент и тщательно измерив отношение количества изотопов, которым предстоит все еще распасться, к количеству продуктов распада, можно определить возраст метеорита. Правда, существуют некоторые осложнения. Например, свинец является продуктом распада урана и тория, но изотопы свинца всегда присутствуют там, где есть эти элементы, поэтому продукты распада урана и тория всегда загрязнены посторонним свинцом. За исключением распада урана и тория, другие процессы радиоактивного распада, а именно превращение калия в аргон, рубидия в стронций и недавно открытый процесс превращения самария в неодим, позволяют получить достаточно надежные сведения о возрасте метеоритов. Согласно недавно возникшей науке космохронологии, все метеориты образовались около 4,57 млрд. лет тому назад в течение интервала, равного 30—100 млн. лет. Это несомненно является сильным аргументом в пользу того, что Солнце и Солнечная система образовались около 4,6 млрд. лет тому назад.

Радиоактивные часы позволили определить возраст лунных пород. Стремление прочесть показания лунных часов было одной из основных причин, по которым образцы лунных пород были доставлены на Землю. Возраст Луны, определенный по этим образцам, оценивается в 4,5—4,6 млрд. лет. Между прочим, наиболее древние образцы горных пород на Земле в Западной Гренландии имеют возраст около 3,6 млрд. лет, а относительное содержание свинца в них соответствует возрасту Земли в 4,45 млрд. лет.

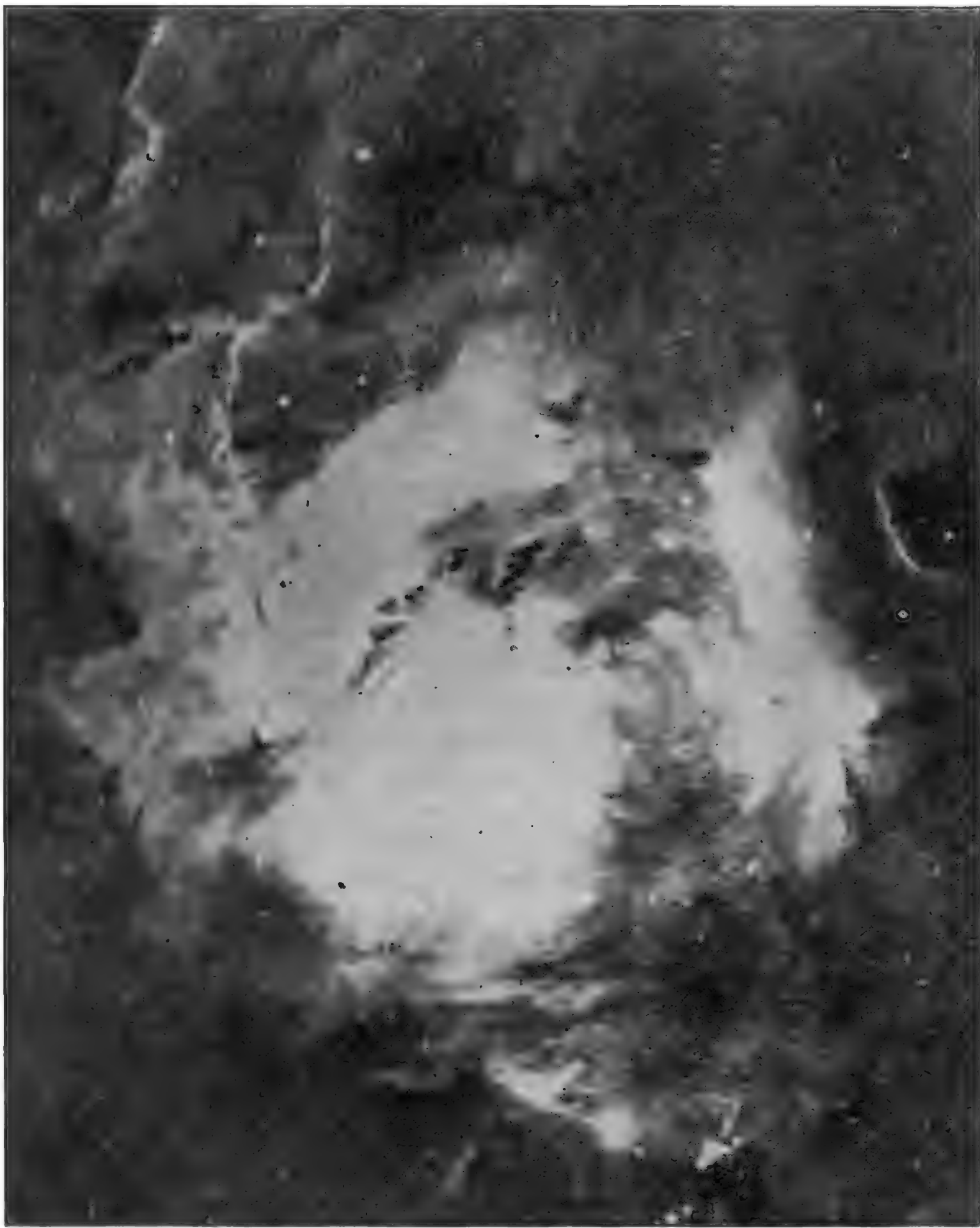
Поэтому можно считать, что Солнечная система образовалась примерно 4,5—4,6 млрд. лет тому назад. С гораздо меньшей точностью оценивается возраст нашей Галактики и Вселенной. В настоящее время полагают, что возраст Галактики составляет 10—12 млрд. лет, а возраст Вселенной — 13 млрд. лет или даже больше. Во всяком случае, можно с уверенностью считать, что Галактика конденсировалась по крайней мере через несколько сот миллионов лет после образования Вселенной, а образование Солнца произошло, когда Галактике уже было по крайней мере 5 млрд. лет.

В последние годы было высказано много предположений относительно процесса образования звезд и, следовательно, Солнца. Местом рождения звезд является газ межзвездного пространства. Образование новой звезды представляется долгим и медленным, если судить человеческими масштабами

времени. Почти все звезды, видимые невооруженным глазом, были на небе еще до появления на Земле человека. И все же мы знаем, что новые звезды должны возникать внутри газовых облаков. Известно, что молодые массивные звезды, живущие всего несколько десятков миллионов лет, обычно образуются вблизи облаков водорода, гелия и других элементов. Кроме того, новые звезды наблюдаются в туманности Ориона, одной из ближайшей к нам областей звездообразования. Наконец, химический состав межзвездного газа подобен химическому составу Солнца и звезд: примерно $3/4$ водорода на $1/4$ гелия с небольшой ($\sim 2\%$) добавкой более тяжелых элементов.

«Образ» жизни газового облака зависит от баланса гравитационных сил и сил давления, возникающих вследствие нагрева и сжатия. Мы встречались уже с одним из вариантов этой вечной космической битвы при обсуждении устойчивости Солнца. Гравитационные силы стремятся сжать во едино все части облака, которые из-за тепловой энергии стремятся рассеяться в космическом пространстве. Около пятидесяти лет назад кембриджский теоретик сэр Джеймс Джинс показал, при каких условиях облако газа может сжаться, образуя компактное небесное тело. Возможность сжатия, а следовательно, рождения звезды зависит от температуры и массы газа: холодные облака сжимаются при меньшей массе, нежели горячие. Тем не менее даже при температуре в 10° выше абсолютного нуля (10 K) масса довольно плотного газопылевого облака должна быть не меньше 10 масс Солнца. Более теплые облака, чтобы сжаться, должны быть еще массивнее. Теория Джинса объясняет также, почему звезды обычно рождаются семействами, называемыми звездными скоплениями. Полная масса звездного вещества типичного молодого скопления равна нескольким тысячам солнечных масс; из этой массы образуются около 200 звезд. Джинс показал, что межзвездному газу легче образовать 200 звезд, чем, скажем, двадцать.

Как видите, не так легко образовать звезды из межзвездного газа. Если бы это было просто, то тогда уже давно (до образования Солнца!) весь газ превратился бы в звезды. Облаку, в котором зародилось наше Солнце, пришлось преодолеть немало препятствий, так как вначале оно было слишком горячим, вращалось слишком быстро, обладало слишком большим магнитным полем, чтобы образовать звезды. При сжатии облако нагревается. Вы, наверно, замечали, что насос, накачивающий камеру, нагревает воздух. Сжимающееся межзвездное облако должно было избавиться от тепла, чтобы сжатие могло продолжаться. Интересно то,



Туманность «Лагуна» (Мессье 8) — это гигантское скопление космического газа и пыли. Темные сгустки вещества на краю туманности типичны для областей, в которых происходит рождение звезд. Гравитационное притяжение объединяет эти сгустки в единое целое. По мере сжатия эти сгустки распадаются на мелкие фрагменты; часть из них, сжимаясь, достигает плотности, достаточной для «поджигания» ядерных реакций в их центральных частях. Таким образом, перед нами семейство молодых звезд, образовавшихся из межзвездной среды. (Обсерватория Китт-Пик, США.)

что сама Галактика оказала помощь облаку в этом процессе.

Наша Галактика имеет два спиральных рукава, и там, где находится Солнце, газ и звезды делают полный оборот примерно за 250 млн. лет. Периодически (скажем, каждые 125 млн. лет) определенное облако проходит через вращающийся рукав Галактики. При столкновении с более плотной частью рукава облако испытывает удар и сильно сжимается. Этот процесс вызывает дальнейшее резкое сжатие. Оптические и радионаблюдения ближайших галактик отчетливо показывают, что образование звезд эффективнее происходит вдоль границ спиральных рукавов, где скапливается вещество. Таким образом, около 5 млрд. лет тому назад облако, из которого затем родилось Солнце, испытало сильный удар при пересечении со спиральным рукавом. При этом пыль внутри облака нагрелась, облако стало излучать энергию в инфракрасной области спектра, унося тем самым часть гравитационной потенциальной энергии. Обычно области образования звезд содержат много пыли и хорошо видны на небе в инфракрасном диапазоне. Избыток энергии облака может также теряться в виде радиоизлучения молекул. По подсчетам радиоастрономов, некоторые молекулы, в частности молекулы воды, могут очень эффективно уносить энергию плотных облаков, излучая в микроволновом диапазоне. По существу, пары воды действуют как мощный мазер. Таким образом, энергия сжимающегося облака уходит в виде излучения в инфракрасной и микроволновой областях электромагнитного спектра.

Я уже сказал выше, что, согласно критерию Джинса, масса облака, из которого появилось Солнце, могла быть равной нескольким тысячам солнечных масс. При конденсации оно разбилось на небольшие облака из-за возникших в отдельных частях облака неустойчивостей. Эти облачка, в свою очередь разбиваются на еще более мелкие фрагменты в процессе сжатия всего облака. В конце концов остаются темные протозвезды и прото-Солнце, продолжающиеся сжиматься, однако уже близкие к своей окончательной форме. Весь этот процесс длился для Солнца около 400 000 лет.

Что происходило дальше, не совсем ясно. Прото-Солнце на этой стадии не было достаточно горячим, чтобы начались ядерные реакции. Осталась также проблема вращения, так как из-за сжатия прото-Солнце стало очень быстро вращаться (подобно тому как ребенок, сидящий на вращающемся кресле с вытянутыми руками, начинает вращаться быстрее, когда он сложит руки). Возможно, некоторое замедление вращения произошло в результате перепутывания магнитно-

го поля прото-Солнца с магнитным полем Галактики. Магнитные силовые линии немного напоминают резину: чем сильнее вы ее растягиваете, тем большее сопротивление она оказывает. При вращении прото-Солнца образуется закрученное локальное магнитное поле, и оно в свою очередь начинает тормозить вращение. Более того, совместное действие вращения и магнитного поля должно было помочь процессу образования диска, когда размер облака приближался к размеру Солнца.

Конечная стадия процесса рождения Солнца продолжалась около 100 000 лет. Внутри прото-Солнца образовалось ядро, сжимающееся под действием силы гравитации, причем температура и давление в нем все время росли. «Включилась» первая ядерная реакция: ядро лития-7 соединилось с протоном, что привело к образованию двух ядер гелия. Такая реакция происходит при температуре около 1 млн. градусов. Этот процесс вскоре истощился. Литий послужил топливом лишь для разжигания ядерного очага. С возникновением ядерных реакций изолированные фрагменты газа наконец-то превратились в молодое Солнце, однако прошло еще какое-то время, прежде чем все окончательно установилось. В первые несколько миллионов лет число ядерных реакций непрерывно росло. Эта фаза закончилась через 50 млн. лет. По-видимому, во время этой фазы существовал огромной мощности ветер, намного более сильный, чем теперешний солнечный ветер, поскольку он сдул прозрачную оболочку родительского облака.

В то время как формировался ядерный очаг, осколки и обломки вещества, оставшиеся за пределами основного сжимающегося облака, уже близкого по размеру к будущему Солнцу, начали объединяться, образуя метеорные тела и протопланеты. По показаниям метеорных часов мы знаем, что конденсация или затверждение продолжались 30—100 млн. лет. Уплотненный планетарный диск при помощи магнитного поля оказался связанным с Солнцем, и эта связь привела к небольшому замедлению солнечного вращения. Однако основной причиной замедления вращения Солнца (сейчас оно совершает один оборот примерно за месяц) явился унос углового момента или энергии вращения сильным ветром из частиц.

Образование планет, должно быть, длилось несколько сот миллионов лет. На последних стадиях малые обломки и агрегаты сталкивались на огромной скорости с большими. На фотографиях Меркурия и Луны можно видеть древние ландшафты со следами такой страшной космической бомбардировки. Куски горных пород — метеорные тела — блуждают в межпланетном пространстве, если можно назвать

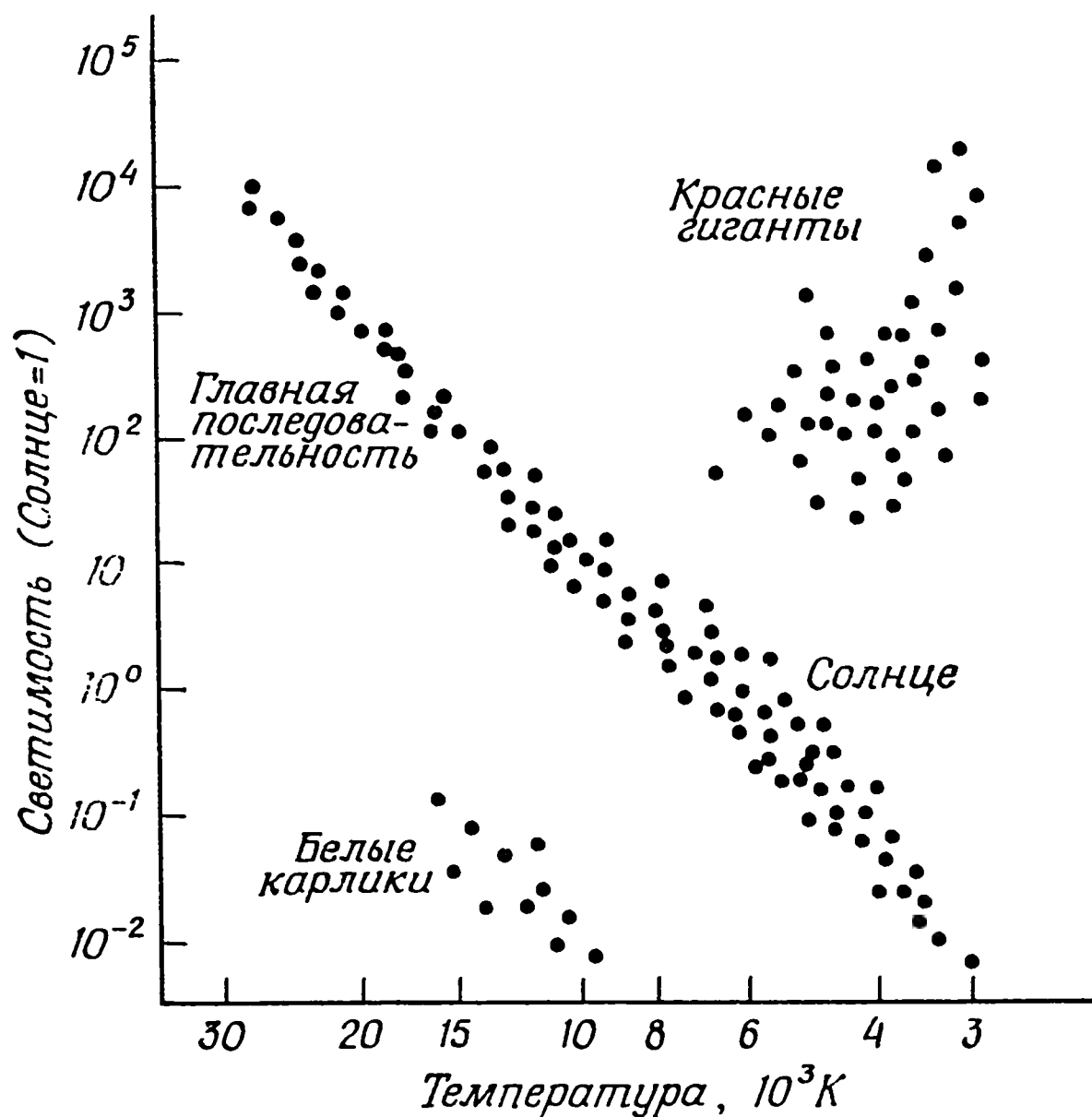


Диаграмма Герцшпрунга — Рассела, по которой можно проследить жизненный цикл звезд. Эту диаграмму можно представить в разных формах; здесь она построена в координатах; температуры звезд — их светимость. В течение большей части своей жизни Солнце будет находиться на главной последовательности, а затем скорее всего станет красным гигантом и закончит свою жизнь белым карликом.

блужданием движение со скоростями 30—100 км/с. Когда вы видите падающую звезду, вы присутствуете при длящейся всего одну секунду смерти камня, более древнего, чем что-либо на поверхности Земли. Этот камень отправился в путешествие по Солнечной системе 5 млрд. лет тому назад. Иногда куски таких метеорных тел падают на поверхность Земли; такие фрагменты называются метеоритами.

Я уже рассказывал об источнике солнечной энергии, действующем большую часть его жизни. Солнце сейчас на середине своего жизненного пути, поскольку уже использована половина его водородных запасов. Поэтому Солнцу остается жить еще 5 млрд. лет. Если мы сопоставим первую половину жизни Солнца нашему календарному году, то можно сказать, что человечество появилось примерно в 22 часа 31 декабря, цивилизация началась за десять минут до полуночи, а телескоп изобрели в последнюю секунду. Лично я сомневаюсь, чтобы наши потомки очень беспокоились из-за того, что Солнце прекратит свое существование. Только из не-

померного тщеславия можно полагать, что человечество является бессмертной вершиной эволюционной цепи. Мы всего лишь достигли большей вершины, чем кто-либо раньше до сих пор, и то с точки зрения земных представлений.

Но во всяком случае, что же будет происходить в последующие 5 млрд. лет? Для ответа на этот вопрос воспользуемся диаграммой Герцшпрунга — Рессела [Г—Р], по горизонтальной оси которой отложена температура звезды, а по вертикальной — ее светимость. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела особенно полезна для предсказания тех быстрых изменений, которые произойдут с Солнцем, когда запасы энергии начнут уменьшаться.

В настоящее время Солнце расположено на главной последовательности, то есть в той группе, где находятся все нормальные звезды водородного цикла. Звезды, расположенные левее и выше положения Солнца на диаграмме, имеют большую массу, чем Солнце; те, что ниже, — меньшую массу. Важно понять, что ни Солнце, ни какая-либо другая звезда не движутся вверх или вниз вдоль по последовательности. Они остаются почти на том же самом месте, пока неслабно потребляют водород, немного смещаясь направо и вверх от главной последовательности по мере того, как его заменяет гелий. При этом светимость может возрасти на одну четверть, хотя поверхностная температура немного уменьшается. Короче говоря, Солнце будет становиться немного больше, немного краснее и будет значительно сильнее светить. Эта фаза эволюции, несомненно, чрезвычайно важна для любой жизни на поверхности Земли через несколько миллиардов лет. Причина, по которой Солнце будет греть сильнее, очень интересна. При сжигании водорода и превращении его в гелий расходуются электроны: 2 электрона на одно ядро гелия. Поэтому со временем запас электронов истощится, и энергии из ядра Солнца будет легче выходить наружу, так как именно электроны несут основную ответственность за задержку фотонов. Они являются главной причиной непрозрачности Солнца.

Когда ядерный солнечный реактор в конце концов выгорит, ядро Солнца начнет сжиматься. Физическая причина снова очень проста. Как только приток энергии уменьшается, ядро охлаждается, и чтобы противодействовать этому процессу, оно сжимается, высвобождая взамен тепловой потенциальную энергию своего собственного гравитационного поля. Сжатие ядра приводит к тому, что несгоревший водород извне ядра падает ближе к центру Солнца. Таким образом, появится новый источник энергии: водород, падающий вниз к центру Солнца, сжимается и нагревается до такой степени,

что начинается сгорание водорода в тонком слое, окружающем ядро. На протяжении этого процесса образующийся гелий сбрасывается в ядро с внутренней стороны этого слоя, в то время как на внешней стороне продолжается сгорание новых порций водорода.

Воображаемые астрономы других планетных систем наблюдали бы через 5 млрд. лет на Солнце драматические изменения. При сжатии ядра внешние слои сильно расширятся, в результате чего Солнце станет огромным красным шаром с диаметром, в 10 раз большим диаметра сегодняшнего Солнца. Такая звезда — красный гигант на диаграмме Г—Р, поток энергии от нее в тысячи раз больше нормального. Ее излучение принесет на планеты иссушающий зной. Здесь играют роль некоторые тонкие физические эффекты. Коллапсирующее (сжимающееся) ядро сохраняет почти неизменную температуру. Для этого оно должно избавиться от части своей внутренней энергии, которая передается внешним слоям или оболочке, приводя к ее резкому расширению. Парадоксальное золотое правило звездной эволюции состоит в том, что сжатие внутренних слоев приводит к расширению внешних. Другой эффект состоит в том, что более холодное и более красное Солнце будет посылать на планеты больше тепла. Это объясняется увеличением поверхности звезды и, следовательно, ее видимого размера, по крайней мере раз в сто. Такое увеличение с избытком компенсирует уменьшение светимости на единицу площади. Что же произойдет с Землей? Океаны и реки закипят, ледяные шапки растают, атмосфера улетит в космическое пространство. Бесплодная скалистая поверхность нашей планеты будет обдуваться яростным солнечным ветром, дующим снова с огромной скоростью. Каждый год Солнце — красный гигант — будет терять одну миллионную (10^{-6}) своей массы. Во внешних частях Солнечной системы гигантские планеты Юпитер и Сатурн будут освобождены от глубокого льда, покрывавшего их поверхности в течение 10 млрд. лет. Ледяной покров, состоящий из метана, аммония и водорода, толщиной в десятки тысяч км испарится. Возможно, обнажатся их скальные ядра. А во внутренней части Солнечной системы Меркурий будет вращаться почти внутри Солнца.

Будут иметь место и другие эффекты: Солнце будет видно так далеко в Галактике, как никогда раньше. На астрономическом языке это означает, что его видимая звездная величина увеличится на 6^m . Подобно тому как в настоящее время красный гигант Бетельгейзе (α Ориона) является одной из самых ярких звезд нашего неба, так Солнце будет господствовать на чужом небе неизвестных планет далеко в

космическом пространстве на расстояниях в тысячи световых лет.

В масштабах астрономического времени это расширение можно назвать непродолжительным. Подобно большинству внезапно развивающихся природных явлений, рассмотренный процесс пойдет слишком далеко. Высокая светимость приведет к невосполняемому расходу теперь уже ограниченного резерва топлива. В оболочке водород будет сгорать все быстрее, сброс продукта горения — ядер гелия — в солнечное ядро будет продолжаться, и когда в центре Солнца накопится достаточное количество гелиевой золы, ее температура начнет расти. Когда температура достигнет 100 млн. градусов, начнется процесс слияния трех ядер гелия (α -частиц), в результате которого образуются ядра атомов углерода. Ядерная топка выйдет из-под контроля, так как температура будет продолжать расти по мере ускорения ядерных реакций, а рост температуры только ускорит темпы сгорания гелия. Условия будут совсем отличными от условий в звездах главной последовательности, когда дополнительный нагрев, приводящий к увеличению давления, компенсируется небольшим расширением — важным стабилизирующим фактором. Нет, конечная стадия солнечной эволюции совсем не мирная, так как давление в ядре будет нечувствительно к температуре. Стадия, на которой возникает гелиевая вспышка, приводящая к образованию углерода (и азота) в ядре, является вершиной эволюции красного гиганта. Конечная вспышка отодвинет, по всей вероятности, внешнюю границу Солнца до положения теперешней орбиты Земли.

Вопреки общераспространенному мнению наше Солнце не станет ни новой, ни сверхновой звездой. Так, вспышка гелия не вызовет внезапного уярчения или нечто похожего на взрыв звезды. Ведь ядро, в котором все это происходит, экранировано протяженной оболочкой.

Дальнейшее поведение Солнца не может быть предсказано с большой определенностью. В конце своего существования как красного гиганта оно может стать неустойчивым. Если на границе ядра создается тонкий слой, где сгорает гелий, могут происходить частые вспышки. Солнце будет в этом случае сокращаться в размерах и становиться горячее, пока давление излучения умирающего ядра не станет достаточно сильным, чтобы рассеять атмосферную оболочку в космическое пространство со скоростью в несколько десятков километров в секунду. Мы не знаем, потеряет ли Солнце свою оболочку сразу целиком или в результате ряда выбросов. Но что известно вполне определенно, это то, что звезды с массой, близкой массе Солнца, образуют планетарную туманность, в

которой кольцо светящегося водорода и гелия окружает крошечную очень горячую звезду с температурой поверхности оксlo 100 000 градусов. Эта центральная звезда фактически представляет собой звездное ядро, горячую, но уже мертвую ядерную станцию звезды.

Конечная судьба солнц удивительно проста. Оболочка туманности постепенно расплывается в межзвездном пространстве, где в конечном итоге объединяется с газовыми туманностями, в которых в далеком будущем могут возникнуть новые поколения звезд и планет. Тем временем горячее ядро, излучая в пространство, постепенно охлаждается. Все это время на диаграмме Г—Р оно передвигается вниз, оказываясь слева от главной последовательности. Оно превратится в белого карлика. Значительная часть массы Солнца будет утрамбована в шар размером в Землю. Белый карлик не сжимается, несмотря на то что его внутреннее гравитационное поле очень сильно. Электроны, эти маленькие заряженные частицы, образующие внешние облака вокруг атомов, сжаты так сильно, что их давление может противостоять гравитации. Это электронное давление возникает не из-за отталкивания электронов, как вы можете предположить. Это особая сила, похожей на которую нет в нашем обычном мире. Эта сила имеет квантовую природу и проявляется только в микромире элементарных частиц. Она возникает вследствие того, что все электроны внутри звезды должны обладать различными по величине энергиями.

При дальнейшем остывании белый карлик медленно гаснет. В конце концов он остынет настолько, что не будет ничего излучать в видимом свете. Он превратится в черного карлика, почти необнаружимую грудку ядерных отходов, состоящих в основном из гелия, углерода, азота и кислорода. Все вещество, в нем содержащееся, на этой стадии достигло конца космической дороги, если иметь в виду предсказуемое будущее Вселенной. Через шесть миллиардов лет Солнце и Земля безусловно будут мертвы.

Исследование эволюции звезд, более горячих чем Солнце, окружным путем приводит нас снова, как мы увидим, к проблеме зарождения Солнечной системы. Не место в книге о Солнце вдаваться во второстепенные детали эволюции звезд, поэтому мы подчеркнем только основные моменты. У звезд с большей массой и, следовательно, более горячих, чем Солнце, процесс превращения водорода в гелий идет другим путем, через углеродно-азотный цикл. Эта реакция состоит из шести стадий, и в ней ядра углерода и азота используются лишь как вспомогательные звенья для образования гелия из самых легких элементов. Сами углерод и азот

не расходуются. Внутри Солнца температура недостаточно высока, чтобы углеродно-азотный цикл мог эффективно осуществляться, но он работает внутри более горячих звезд, центральная температура которых превышает 16 млн. градусов. Вклад этого цикла в энергию, выделяющуюся внутри Солнца, составляет всего около 2 %.

Одной из наиболее важных характеристик звезд с большей, чем у Солнца, массой является меньшая продолжительность жизни. Это может показаться немного странным: ведь у более крупных звезд больше топлива и поэтому они должны вроде бы жить дольше. Верно, у них больше топливных запасов, но они расходуют их гораздо быстрее. Так, звезда с массой в 5 раз большей солнечной имеет в 5 раз больше водорода для ядерного реактора. Однако большая масса приводит к большему сжатию и, следовательно, к более высоким значениям температуры и давления в центре звезды. В результате скорость ядерных реакций увеличивается примерно в тысячу раз. В итоге смерть звезд наступает в двести раз быстрее, примерно через 50 млн. лет. Теперь задумайтесь над следующим вопросом. Человек появился только через 5 млрд. лет после образования прото-Солнца. Могла ли разумная жизнь развиться на планетах, вращающихся вокруг звезд большой массы? Вряд ли, ведь время жизни этих звезд слишком мало.

И все же самое удивительное, что именно эти расточительные звезды сделали возможным зарождение жизни. Когда звезда типа Солнца умирает, она сбрасывает газовую оболочку в космическое пространство и сжимается в шар, содержащий легкие элементы: гелий, углерод, азот. Но когда умирает массивная звезда, она делает это гораздо эффективнее. Объект в 10 раз массивнее Солнца просто не может погаснуть тихо. При истощении запасов топлива, ядро такой звезды очень быстро сжимается, возможно в течение секунды, превращаясь или в небольшой нейтронный шар диаметром 10 км, или, может быть, даже в черную дыру. В результате такого направленного внутрь взрыва, или имплозии, возникает ударная волна, пересекающая внешнюю оболочку в то время, когда она начинает обрушиваться на ядро. Ударная волна сжимает газ, и в течение следующей секунды его температура возрастает до значения, достаточного для ядерного взрыва. Решающий момент во всем этом процессе — внезапная смерть ядра в результате эффекта гравитации, которому уже не может противостоять давление. Это лишает оболочку звезды возможности спокойно перестроиться. Умиравшей массивной звезде ничего не остается, как превратиться в сверхновую звезду.

а



б



в



Взрыв сверхновой в другой звездной системе — спиральной галактике IC4182. На первом снимке (23 августа 1937 г.) вспыхнувшая звезда четко видна, но другие области галактики на фотографии не запечатлелись. Второй снимок сделан через три месяца; угасающая сверхновая еще слегка видна. Наконец, на снимке с длительной экспозицией, сделанном через пять месяцев после максимума блеска сверхновой, нет ни малейшего следа вспыхнувшей звезды. (Хейловская обсерватория, США.)

Взрыв звезды большой массы создает благоприятные условия для образования тяжелых элементов. В горячей богатой гелием оболочке звезды образуются изотопы таких элементов, как неон, магний, кремний, сера и других, еще более тяжелых, вплоть до железа (такие процессы происходят также и в центре массивных звезд). Элементы тяжелее железа образуются путем захвата ядер гелия и, что еще важнее, свободных нейтронов.

Взрыв сверхновой выбрасывает газ в космическое пространство. Этот газ обогащен тяжелыми элементами, образованными либо в ядерном очаге, либо во взрывающейся оболочке. Это вещество уносится в пространство со скоростями, превышающими 10 млн. км/час. За миллионы лет скорость



Негатив снимка остатков древней сверхновой — так называемой «Петли» в созвездии Лебедя. Этим остаткам примерно 100 тыс. лет, и они постепенно расплываются в межзвездной среде. (Из Паломарского обзора неба, США.)

их уменьшается, и они незаметно сливаются с веществом газовой туманности межзвездного пространства. Теперь сцена готова для нового действия — для образования нового поколения звезд, обогащенного «золотом» своих предков. Таким образом, все вещество Земли и наших тел создано в конечном счете из водорода и гелия во время ядерных взрывов, имевших место задолго до рождения Солнца. Ведь первое поколение звезд, образовавшихся на ранней стадии эволюции нашей Галактики, не могло бы иметь планет. Планеты могут возникать лишь у звезд, которые, подобно Солнцу, содержат некоторую долю вещества, уже участвовавшего в одном из циклов.

Наша дневная звезда служит астрономам-теоретикам легко доступным испытательным стендом для проверки их моделей. Действительно, в самой основе моделей звездных структур лежат солнечные модели. Поэтому вполне понятно,

что, когда подвергают сомнению правильность моделей Солнца, это очень сильно волнует теоретиков.

Именно такая ситуация в конечном счете привела к открытию дрожаний или колебаний Солнца. Открытие таких дрожаний аризонским исследователем Генри Хиллом является одной из самых интересных (в том числе по своему неправдоподобию) страниц истории астрономии.

Все началось совсем в стороне от исследований Солнца, с новой теории Вселенной Бранса и Дикке, которая была предложена ими в противовес общей теории относительности Эйнштейна. Это так называемая скалярно-тензорная теория гравитации. При анализе этой теории стало ясно, что Солнце может помочь в решении вопроса, действительно ли теория Эйнштейна неверна. Как уже упоминалось, планета Меркурий может служить хорошим «зондом» для изучения гравитационного поля Солнца. Эллиптическая орбита этой планеты непрерывно поворачивается в пространстве, то есть орбита представляет собой вращающийся эллипс, положение которого после того, как планета совершила полный оборот, будет несколько отличаться от прежнего. Это движение, называемое поворотом перигелия Меркурия, имеет дополнительную составляющую, с большой точностью объясняемую общей теорией относительности Эйнштейна. Объяснение всех трудностей, связанных с поведением ближайшей к Солнцу планеты, было как раз одним из триумфов общей теории относительности.

Новая теория взаимодействия вещества и гравитации Бранса — Дикке не смогла объяснить смещения, соответствующего 7 % дополнительной составляющей движения орбиты Меркурия.

Дикке нашел следующий выход из создавшегося положения. Он предположил, что Солнце слегка сплюснуто, как апельсин; в этом случае Меркурий не будет двигаться в совершенно симметричном солнечном гравитационном поле. Для сохранения теории необходимо весьма незначительное искажение формы Солнца; достаточно, чтобы его экваториальный и полярный радиусы отличались всего на 30 км. Таким образом, необходимо было снова обратиться к исследованию Солнца.

Однако измерения таких малых ($\sim 0,05\%$) искажений формы Солнца очень трудны. Теоретикам также надо было понять, из-за чего Солнце может оказаться сплюснутым. Была предложена гипотеза, что сплюснутость объясняется быстрым вращением ядра. Это бы означало, что ядро вращается быстрее внешних слоев Солнца. Такая идея казалась привлекательной и по другой причине: быстрое вращение понизило

бы температуру в центре Солнца и тем самым уменьшило бы поток нейтрино. Таким образом, теория Эйнштейна оказалась под ударом, поскольку новая теория могла походя решить проблему нейтрино. Только измерения могли решить этот вопрос.

Поверхность Солнца — не гладкая. Бури, вспышки и солнечные пятна искажают ее. Более того, эти явления влияют на яркость и вносят тем самым ошибку в измерения формы диска. Генри Хилл в Аризонском университете построил телескоп, специально предназначенный для обнаружения искажения формы солнечного края. Однако никаких искажений не было обнаружено. Это означало, что Эйнштейн был прав; центральные части Солнца не испытывают быстрого вращения, а проблема нейтрино остается все еще нерешенной. Но путем многочисленных измерений Хилл и его коллеги открыли новое явление: периодические колебания Солнца. На солнечном лимбе он обнаружил явление, подобное колокольному звону. Но этот звон имеет очень низкий тон, основной период колебаний равен 52 мин: кроме того, «слышны» еще несколько гармоник.

Открытие колебаний Солнца, сделанное совершенно случайно в результате проверки неверной теории, имеет важные последствия для теоретиков-создателей солнечных моделей. Подобно тому как сейсмические колебания Земли, вызванные землетрясениями, дают информацию о внутренней структуре Земли, нормальные моды колебания Солнца сильно зависят от распределения температуры и плотности внутри Солнца. Кембриджские исследователи использовали удивительные результаты Хилла для критического анализа моделей структуры Солнца. Классические солнечные модели выдержали это испытание с честью, но в результате нейтринная проблема так и остается нерешенной.

Другие группы исследователей сообщили об обнаружении солнечных колебаний с еще более длинными периодами, равными почти трем часам. Поскольку эти измерения не были подтверждены независимыми экспериментами, они пока не могут считаться надежно установленными. Но если трехчасовые колебания Солнца окажутся действительно реальными, это снова вызовет смятение в умах теоретиков.

По нашему мнению, современные представления о центральных областях Солнца хорошо обоснованы, причем теория и наблюдения неплохо подтверждают друг друга. Это также означает, что модели эволюции звезд главной последовательности, подобных Солнцу, по всей вероятности, близки к истине. Конечно, изучение самих звезд помогает подтвердить результаты солнечных исследований. Особенно

важным представляется изучение поведения звездных скоплений. Когда в космическом газовом облаке рождается звездное скопление, его члены сильно различаются по массе. Поскольку звезды с большей массой эволюционируют быстрее, в каждый определенный момент скопление представляет собой картину звездной эволюции: тяжелые звезды почти при смерти, а небольшие только-только начали использовать свои топливные запасы. Поэтому диапазон свойств звезд внутри скопления характеризует различные фазы развития нормальной звезды. Изучение скопления является наиболее важной основой для проверки звездных моделей. Анализ звездных скоплений подтвердил нашу веру в надежность солнечных моделей.

В этом кратком обзоре мы подошли к пределу наших знаний о структуре внутренних областей Солнца. Помогут ли новые результаты решить проблему нейтрино? Будем надеяться на это. В оставшейся части этой книги наше внимание будет обращено на то, что можно назвать наружностью Солнца, на те слои, которые непосредственно поддаются наблюдениям.

Поверхность и атмосфера

Видимая поверхность Солнца, фотосфера, находится в состоянии непрерывной активности. Турбулентные движения конвективных ячеек под поверхностью приводят к образованию тонкой структуры солнечной грануляции, описанной в гл. 4. Температура поверхности может быть определена несколькими способами. Например, если для спектрального распределения белого света фотосферы найти с возможно большей точностью соответствующую кривую излучения черного тела, то мы определим чернотельную температуру фотосферы. Она оказывается равной 6000 К. Другой способ заключается в нахождении температуры Солнца исходя из величины излучаемой им энергии. Эта температура оценивается в 5800 К.

Не существует какой-то одной «правильной» солнечной температуры, так как Солнце — сложный объект, в котором температура меняется с высотой над поверхностью. Мы получаем энергию от слоя толщиной около 500 км, температура в котором меняется с глубиной. Излучение центра диска приходит в основном от слоев с температурой газа, равной 6500 К, в то время как за излучение края ответственны более холодные слои. Любой метод определения температуры является компромиссным, но это не так важно, если точно определены его условия.

Резкий край Солнца, о котором мы говорили в гл. 4, возникает следующим образом. Вблизи фотосферы большая часть поглощения видимого света создается особым типом атома водорода. Обычный атом водорода имеет один протон и один обращающийся вокруг него электрон, он устойчив и электрически нейтрален. Иногда атом водорода на время может захватить добавочный электрон, превращаясь в атом водорода с двумя электронами и отрицательным электрическим зарядом. Такая частица называется отрицательным ионом водорода. Это состояние может сохраняться лишь в определенном интервале температур. На Солнце переход от одного состояния к другому происходит быстро, и в результате, когда излучение просачивается вверх, оно внезапно встречает область, в которой поглощающие его ранее ионы водорода практически отсутствуют. Поэтому излучение почти

беспрепятственно выходит наружу. Именно внезапность изменений, как уже отмечалось ранее, и приводит к появлению резкого солнечного края.

Желто-белый свет фотосферы обладает плавно меняющимся спектром, в котором отсутствуют линии. Но прежде чем покинуть Солнце окончательно, свет должен пересечь более холодные слои его атмосферы. Внутри этой более холодной зоны свет испытывает поглощение, благодаря которому мы получаем очень ценную информацию относительно атмосферных условий. В старых книгах этот слой иногда называется обращающим.

Хорошо известно, что радуга возникает в результате взаимодействия солнечного света с дождевыми капельками. Научный анализ солнечных радуг начался с Исаака Ньютона, который в 1665 г. разложил свет в цветной спектр при помощи призмы, поставленной на пути узкого светового пучка. Он производил оптический опыт, не ставя перед собой каких-либо астрономических задач. Ньютон обнаружил наличие цветного спектра и тем самым положил начало солнечной спектроскопии. Впервые темные линии в солнечном спектре зарегистрировал в 1802 г. Волластон. Это подтолкнуло других астрономов на спектральные исследования; самым выдающимся был Фраунгофер.

Фраунгофер в процессе детального исследования ввел для основных темных линий в интервале от красной до синефиолетовой части спектра буквенные обозначения, тем самым впервые введя некоторую систему в изучение спектра. До сих пор для некоторых линий используются его буквенные обозначения (например, D-линия патрия). Линии поглощения оказались очень полезными для физиков, когда Кирхгоф и Бунзен (тот самый, кто изобрел бунзеновскую горелку) стали сопоставлять структуру линий поглощения с яркими эмиссионными линейчатыми спектрами атомов горячих газов, полученными в лаборатории. Тем самым они начали систематическое изучение атомной физики. Они первыми приступили к выяснению состава внешних слоев солнечной атмосферы.

Темные линии возникают из-за поглощения атомами света. Когда «чистый» свет фотосферы встречается с холодными атомами, последние поглощают излучение на вполне определенных длинах волн, в точности соответствующих тем энергиям, которые необходимы для перевода электрона атома из одного энергетического состояния в другое. Когда электрон возвращается обратно, он снова излучает такую же энергию, но уже в совершенно случайном направлении. Поэтому вдоль определенного направления на длинах волн, со-

ответствующих данным атомным переходам, яркость излучения уменьшится. Каждый элемент имеет свою характерную совокупность линий поглощения, поскольку уровни энергии электронов у каждого элемента разные. Поэтому атомный спектр каждого элемента уникален, и это дает возможность определить, присутствует ли данный элемент во внешних слоях звезды.

На Солнце бóльшая часть поглощения в спектре создается в слое толщиной 500 км. Этот слой неоднороден. Хотя в его самых нижних слоях уже имеет место небольшое поглощение, но в то же время еще продолжается процесс фотосферной эмиссии. Постепенно положение меняется, поскольку с ростом высоты температура уменьшается. Вблизи верхней границы слоя имеет место только поглощение.

Спектроскопические исследования позволили астрономам выяснить состав, структуру и поле скоростей атмосферы Солнца. Состав атмосферы был определен путем сопоставления совокупности линий в солнечном спектре с лабораторными спектрами. Около шестидесяти из девяноста двух встречающихся в природе элементов определенно обнаружены в атмосфере Солнца. На основании химического анализа метеоритов можно предположить, что в ней присутствуют еще двадцать элементов. Однако их присутствие не приводит к появлению обнаружимых линий либо потому, что содержание этих элементов весьма незначительно, либо их атомная структура такова, что при солнечной температуре не возникают подходящие переходы. Среди отсутствующих элементов периодической таблицы имеется группа связанных между собой элементов, известных как актиниды. Эти чрезвычайно радиоактивные элементы (полоний, астатин, радон, франсий, актиний и протоактиний) возникают при радиоактивном распаде более долгоживущих элементов урана и тория. Поэтому их отсутствие не удивительно. Некоторые элементы обнаружены не в атомной, а в молекулярной форме. Так, присутствие элемента фтора определяется из молекулярных переходов фтористого магния и фтористого стронция.

Одним из самых удивительных результатов ранней солнечной спектроскопии было открытие совершенно нового элемента — гелия, самого легкого газа после водорода. Гелий был обнаружен английским ученым Норманом Локьером во время затмения 1868 г. и только спустя четверть века смог быть исследован в лабораторных условиях. Определение истинного количества гелия в солнечной атмосфере — задача чрезвычайно трудная, так как линии гелия очень слабы. Гелий возбуждается лишь при температурах намного более

высоких, чем на Солнце. Но определенно можно сказать, что гелий — наиболее распространенный элемент на Солнце после водорода. Считается, что общая масса гелия составляет от 15 до 35 % массы атмосферы, причем разумное компромиссное значение равно 25 %. Обычно при расчетах принимают, что водород и гелий составляют примерно $3/4$ и $1/4$ общей массы атмосферы соответственно. Все другие элементы, вместе взятые, составляют только 1,3—1,8 % массы атмосферы, и все же именно они ответственны за появление свыше 20 000 фраунгоферовых линий (это не означает, что все они были открыты Фраунгофером, заслуга эта главным образом принадлежит Роулэнду). Железо, существующее на Солнце в виде нескольких различных атомных структур, образует несколько тысяч линий. Даже те элементы, относительное содержание (т. е. содержание относительно водорода) которых равно или меньше 10^{-9} , вполне могут быть выявлены спектральным анализом.

Определение относительного состава различных элементов в атмосферах звезд по фраунгоферовым линиям поглощения требует чрезвычайной точности. Для этого надо, чтобы спектральный материал был самого высокого качества, причем очень важно, чтобы спектр на пластинке был достаточно растянут (то есть получен с большой дисперсией); в этом случае последующие измерения можно проводить с большей точностью. Затем спектральная информация переводится в графическую форму или форму, удобную для вычислительной машины. Такой перевод осуществляется путем измерения меняющейся интенсивности узкого пучка света лазера, падающего на передвигаемую с постоянной скоростью поперек луча фотопластинку. Для каждого элемента строятся профили линий, то есть кривые зависимости интенсивности от длины волны в окрестностях данной линии. Солнечные линии водорода имеют глубокий и широкий профиль, в то время как многочисленные линии железа — узкие и мелкие. Получить из таких профилей количественную информацию — целое искусство.

Легкость образования спектральной линии для разных элементов различна. Профиль линии, который можно рассматривать как основной источник информации о содержании элемента, является функцией относительного содержания, температуры, давления и атомных параметров. Влияние электронных энергетических уровней можно рассчитать или определить путем лабораторных наблюдений. По существу, здесь учитывается тот очевидный факт, что в атомах некоторых элементов (например, натрия, кальция и железа) внешние электроны организованы так, что поглощение происходит с боль-

шой вероятностью, тогда как другие атомы (классический пример — гелий) поглощают плохо. После того как влияние атомной структуры учтено, можно обратиться к нахождению температуры и относительного содержания. Температуру можно определить без особого труда. Ведь, в конце концов, она одинакова для всех элементов. Тогда из основных неизвестных параметров останется только относительное содержание.

Солнечные и звездные спектроскописты все еще вынуждены проделывать различные манипуляции с огромным числом переменных. Большая часть информации для звезд получена путем детального анализа профилей линий. Для Солнца вместо такой сложной процедуры используется модель атмосферы. По существу, построение модели представляет собой моделирование солнечной атмосферы при помощи вычислительной машины, которая решает уравнения переноса излучения во внешнем более холодном слое солнечной атмосферы. Для различных физических условий могут быть построены обобщенные профили линий. Относительное содержание элементов определяется путем сопоставления расчетных и наблюдаемых профилей. Модель стандартной солнечной атмосферы сейчас широко используется при расчетах на электронно-вычислительных машинах, но в звездной астрономии эта методика пока не очень развита.

Общий химический состав атмосферы нашего Солнца подобен составу большинства других звезд, образованных в последние несколько миллиардов лет. По сравнению с очень старыми звездами они содержат в несколько десятков раз больше элементов тяжелее водорода и гелия. Это согласуется с общим представлением о редкой встречаемости тяжелых элементов в ранний период эволюции Вселенной. Впервые большое количество тяжелых элементов появилось в результате ядерных реакций во время взрывов звезд и, может быть, галактик. В период образования Солнца межзвездная среда уже была обогащена тяжелыми элементами, образовавшимися при взрывах первых поколений звезд.

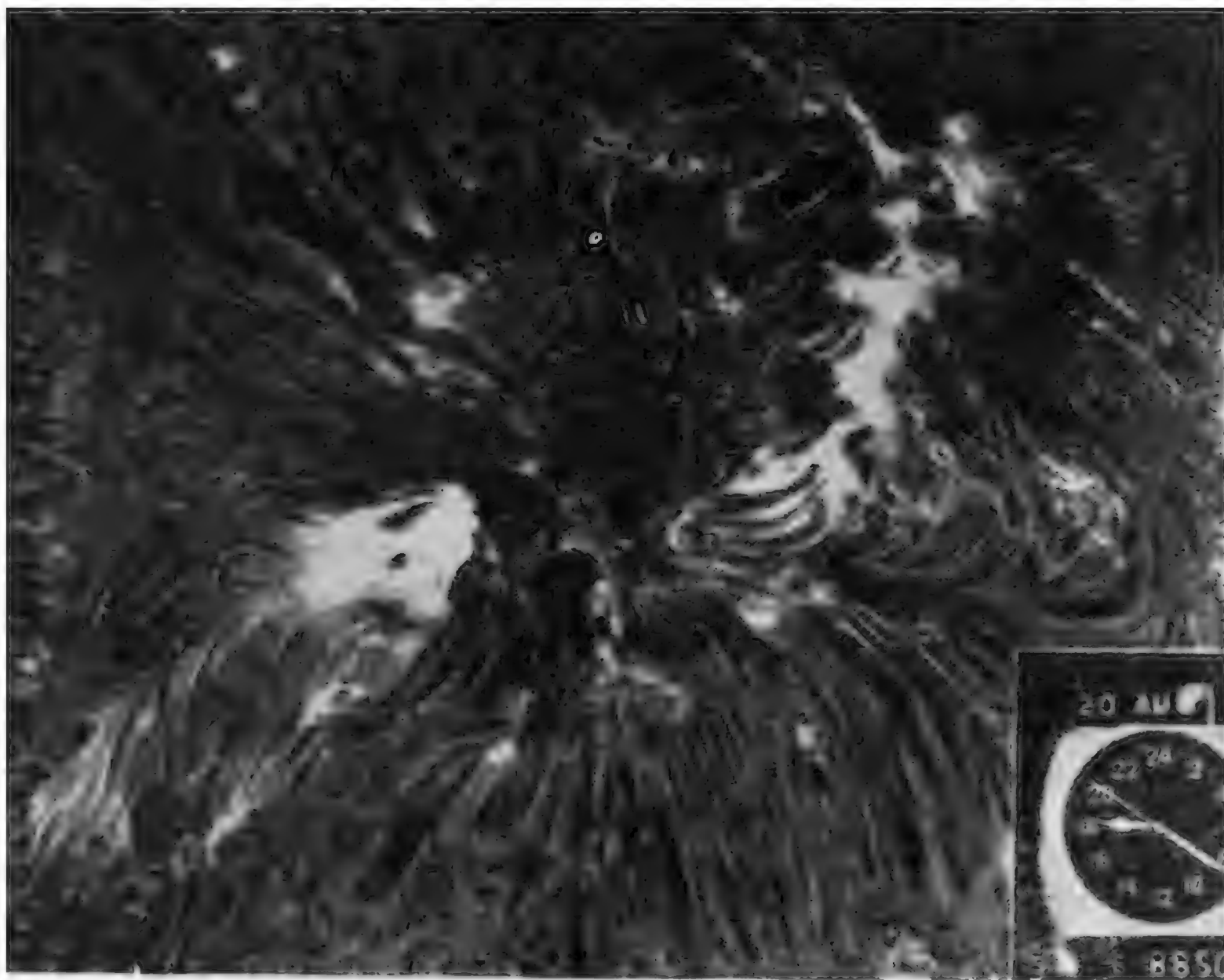
За небольшими исключениями, состав тяжелых элементов в атмосфере Солнца такой же, как у газового облака, из которого оно образовалось. Солнце само не производит тяжелые элементы для обогащения своей атмосферы. (Я не рассматриваю здесь вопрос о возможности загрязнения атмосферы Солнца гелием солнечного ядра в результате процесса перемешивания. Во всяком случае, Солнце не вырабатывает элементов тяжелее гелия.) Земля и другие планеты конденсировались из того же вещества, что и Солнце,

поэтому солнечная спектроскопия информирует нас также о химическом составе вещества, из которого образовалась Земля.

Солнечная атмосфера содержит небольшие количества лития и бериллия, двух самых легких (после водорода и гелия) элементов. Этот факт требует объяснения, поскольку указанные элементы уничтожаются при ядерных реакциях. Уже при температурах в 1 млн. градусов ядра этих элементов захватывают сталкивающиеся с ними протоны и затем делятся на ядра гелия. Литий и бериллий должны были сгореть на первых стадиях существования прото-Солнца. Конечно, можно предположить, что атмосферные слои никогда не перемешивались достаточно эффективно с несколько более глубокими слоями, температура которых превышает 1 млн. градусов. Однако такое предположение трудно согласуется с турбулентностью внешних слоев. Наблюдения при помощи орбитальной солнечной обсерватории (OSO-7) в конце 1972 г. указали на возможность другого, более любопытного объяснения.

Гамма-детектор, установленный на этом спутнике, зарегистрировал в гамма-спектре две сильные линии. Одна из этих линий может быть обязана процессу аннигиляций электрона и позитрона, при котором образуются два фотона с одинаковой энергией. Другая линия, соответствующая большей энергии излучения, может быть связана с процессом синтеза протона и нейтрона, при котором образуется дейтрон. Обнаружение этих линий показало, что в солнечных областях большой активности имеют место ядерные реакции (другими словами, уничтожение электронов и синтез протон-нейтронных пар). Поэтому наличие лития и бериллия на Солнце может вполне объясняться ядерными реакциями в атмосфере. Эти элементы могут образоваться в возмущенных и вспышечных областях, где протоны ускоряются до высоких энергий. В некоторых редко встречающихся звездах (но не на Солнце) спектроскописты обнаружили линии, которые выдают присутствие технеция, радиоактивного вещества с периодом полураспада около 200 тыс. лет. Он также, должно быть, образован в результате ядерных реакций в атмосферах звезд.

Фраунгоферовы линии несут еще и другую информацию помимо сведений о присутствии и относительном содержании химических элементов. Точное положение линии в спектре (точная длина волны) и ширина профиля зависят от магнитного поля, газового давления и скорости вдоль луча зрения наблюдателя. Влияние скорости приводит к хорошо известному эффекту Доплера: если источник поглощения дви-



Белые участки вблизи пары темных солнечных пятен — это яркое излучение солнечной вспышки. Во время вспышки ядерные частицы могут быть ускорены до энергий, достаточно высоких для того, чтобы начались ядерные реакции. Этот механизм может быть ответствен за гамма-излучение в линиях, идущее от солнечной поверхности. (Солнечная обсерватория Биг Бэр, США.)

жется по направлению к нам, линия сдвигается в сторону более коротких длин волн, то есть в синюю сторону; и наоборот, при движении источника от нас линия перемещается к более длинным волнам, то есть в красную сторону. Величина смещения пропорциональна скорости (для скоростей, намного меньших скорости света).

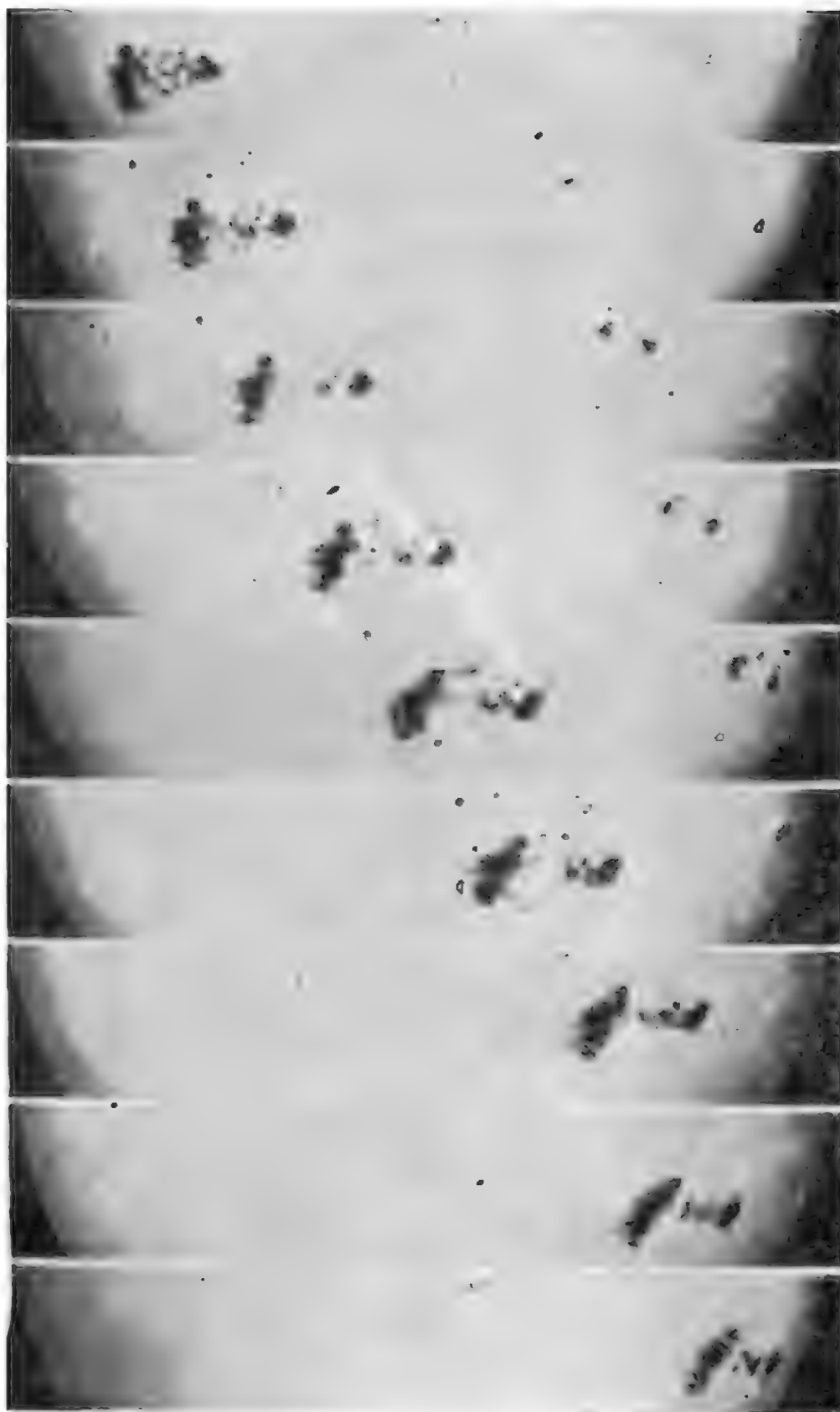
Измерения доплеровского смещения могут быть использованы для нахождения скорости вращения Солнца. Солнце не вращается жестко, как Земля. Полностью состоящее из газа, оно на экваторе вращается быстрее, чем на полюсе. Измерения доплеровского смещения показывают, что Солнце совершает полный оборот на полюсах примерно за 37 дней. Чем ближе к экватору, тем газ движется быстрее, и полный оборот на экваторе совершается примерно за 26 дней. Я привел значения периодов вращения относительно удаленных звезд. Мы на Земле измеряем другие скорости вращения, так как наша планета вращается вокруг Солнца в том же

направлении, что и само Солнце. Поэтому измеряемые нами периоды вращения Солнца относительно Земли меняются от 40 дней на полюсе до 27 дней на экваторе. Если сравнить эти значения с приводимыми в других источниках, то они могут показаться несколько завышенными. Большинство авторов приводят значения периодов вращения, основанные на измерениях движений солнечных пятен. Как мы увидим выше, в пятнах огромную роль играет магнитное поле, поэтому они не могут служить надежным индикатором «реального» периода вращения. Если Солнце действительно имеет быстро вращающееся ядро, то магнитное поле и солнечные пятна будут двигаться быстрее.

В результате спектроскопического изучения скоростей в 1960 г. было сделано еще одно важное открытие. Было обнаружено, что солнечная атмосфера «дышит» с хорошо выраженным средним периодом, равным 5 мин. Скорости, связанные с этим колебанием атмосферы, составляют около 0,5 км/с (больше 1500 км/час). Сразу же под конвективной зоной газ периодически поднимается и опускается, проходя за каждый период вертикальное расстояние, примерно равное 50 км. Что за погода была бы на Земле, если бы ее атмосфера совершала также прыжки каждые 5 минут! Слой атмосферы над конвективной зоной обладает собственной резонансной частотой для звуковых волн, подобно органной трубе. Было высказано предположение, что волны давления, или звуковые волны, образуются в конвективной зоне на определенных частотах, совпадающих с резонансными частотами слоев, лежащих сразу же под фотосферой. Таким образом, волны раскачивают фотосферу, заставляя ее то подниматься, то опускаться.

Я уже рассказывал о колебаниях, обнаруженных Генри Хиллом. Эти колебания проникают к самому центру Солнца. С другой стороны, пятиминутные колебания являются резонансными для внешних слоев. Сопоставление этих двух типов колебаний дает астрономам еще один способ заглянуть внутрь Солнца.

Исследование фотосферы и других слоев атмосферы Солнца может проводиться чрезвычайно эффективно при помощи узкополосных фильтров. Эти фильтры пропускают без заметного поглощения излучение в очень узком интервале длин волн, центрированном на определенной спектральной линии. Тем самым они выделяют излучение, посылаемое каким-нибудь одним элементом. Для выделения узкой спектральной полосы в этих фильтрах используется эффект интерференции. Фильтр такого типа представляет собой диагностический инструмент большой важности. Поскольку тем-



Классическая последовательность фотографий солнечных пятен, полученная на обсерватории Маунт Вилсон, хорошо показывает вращение Солнца. Истинную скорость вращения Солнца надежнее определять из спектроскопических наблюдений, поскольку на солнечные пятна сильно воздействуют магнитные поля из более глубоких слоев Солнца. (Хейловская обсерватория, США.)

температура в атмосфере меняется с высотой, то на разных уровнях основными источниками линий поглощения (и иногда линий излучения) будут различные элементы. Поэтому можно изучать излучение определенных слоев. Таким образом, можно сбрасывать «маски» с Солнца.

Посмотрим, как можно, например, выделить хромосферу. Розовый свет этого слоя, хорошо видимый невооруженным глазом только во время затмений, создается главным образом излучением первой спектральной линии бальмеровской се-



На этой фотографии (фильтрограмме, полученной на солнечном телескопе обсерватории Мак-Мас в свете К-линии кальция (394,4 нм) хорошо видна хромосферная «сетка». (Национальная обсерватория Китт-Пик, США.)

рии водорода. Эта линия имеет длину волны λ 656,3 нм. Фильтр, прозрачный только в интервале 656,25—656,35 нм, выделит эту линию. В фотосфере она одна из самых темных, с чрезвычайно сильным поглощением, поэтому фотосфера через фильтр совсем не видна. Пройдет только свет, излучаемый водородом в хромосфере. Таким путем мы можем получить фотоснимки этого слоя, несмотря на то что простым глазом он виден только во время затмения. Кроме водородной линии часто для исследований структуры и активности хромосферы используют линию ионизованного кальция λ 393,4 нм.

Структура яркости хромосферы, видимая через фильтры, называется хромосферной сеткой. Она соответствует очертаниям глубоко расположенных конвективных ячеек, называемых также супергрануляционными. Сетка совпадает с областями усиленного магнитного поля. Подобно очертаниям земных облаков, сетка непрерывно меняется, характерное время ее жизни около одного дня.



На снимке в крыле H α -линии водорода ($636,30 \pm 0,08$ нм) хорошо видны спикеры по краям ячеек супергрануляции. Маленькие яркие пятнышки — основания спикерных «розеток» в фотосфере. На переднем плане в центре — небольшая активная область. Темные точки соответствуют поглощению в вершинах петель. (Обсерватория Сакраменто-Пик, США.)

Если же мы будем рассматривать солнечный диск в красном свете линии водорода или в синей линии ионизованного кальция, то при замене фильтров мы можем увидеть также и фотосферную сетку. Она совпадает с крупномасштабной структурой хромосферы. На фотоснимках, полученных через фильтры с высоким пространственным разрешением, видна очень разнообразная и все время изменяющаяся структура — видны поры, волосики и бородавки солнечной кожи. Множество тонких темных линий, похожих на листочки травы, образуют на поверхности завитки и кружки. На солнечном диске они выглядят темными, а на краю Солнца на фоне темного неба — светлыми. Солнечники пользуются разными названиями для описания явлений солнечной дерматологии. Темные линии называются фибриллами или волокнами, а их яркие двойники на лимбе — спикулами. Спикулы расположены в нижней хромосфере главным образом на границе супергранул. Внешне спикулы похожи на струи, пламя или горящую изгородь. Каждая спикула живет от 2 до 10 мин, затем на ее месте появляется новая. На «Скайлэбе» было получено много тысяч фотоснимков спикул и сеточной структуры верхней хромосферы. Этот верхний хромосферный слой имеет температуру около 70 000 К. В него вкраплены ошетилившиеся ряды спикул, высота которых над поверхностью достигает 25 000 км. На снимках в ультрафиолете, полученных на «Скайлэбе», на солнечной полярной шапке видны гигантские спикулы высотой 40 000 км и шириной, в два раза превышающей размеры Земли. Эти спикулы существовали около часа. Они являются одним из проявлений вспененной структуры хромосферы, из которой вещество может выплескиваться со скоростями, превышающими 150 км/с.

Теперь я хочу описать невидимую составляющую атмосферы — солнечное магнитное поле. Магнитное поле Солнца измеряет особый прибор, называемый магнитографом. Физический принцип, положенный в основу этого прибора, связан с возмущением электронной структуры атома магнитным полем. В результате энергетические уровни атомов расщепляются, образуя тонкую структуру. На спектре отдельные линии видны расщепленными на отдельные близко расположенные составляющие. Кроме того, излучение расщепленных линий поляризовано. Путем определенной комбинации фильтров поляризованные линии могут быть выделены, а их относительные интенсивности измерены. В результате могут быть определены напряженность и направление магнитного поля. В настоящее время такие измерения проводятся систематически при помощи магнитографов, а измеряемые параметры



На магнитограмме, полученной с помощью солнечного телескопа Мак-Мас, видны области положительной (белые) и отрицательной (темные) полярности магнитного поля. Видна большая группа солнечных пятен (справа внизу), близкая к распаду. Сильное магнитное поле на поверхности связано с активными областями на Солнце; это области, в которых сильное магнитное поле из недр Солнца проникает на поверхность. (Национальная обсерватория Китт-Пик, США.)

магнитного поля представляются либо в виде электронных сигналов, либо изображений на фотопленке или на экранах телевизионных трубок и мониторов.

Солнечное магнитное поле имеет очень сложную структуру. На Земле ситуация относительно проста: наша планета имеет постоянное магнитное поле, являющееся дипольным (как у магнитного бруска) с двумя магнитными полюсами. Магнитное поле Земли постепенно меняет свое направление, и за несколько сотен тысяч лет сменит его на обратное. Но день ото дня или даже на протяжении годов ничего особенного не происходит. Геофизики полагают, что магнитное поле Земли генерируется механизмом типа динамо в жидком металлическом ядре Земли. Поле Солнца имеет сложную структуру и меняется непрерывно. Более того, магнитное поле Солнца примерно каждые 11 лет «переворачивается», что

является одним из проявлений почти регулярного циклического характера изменений на Солнце.

Если уйти очень далеко от Солнца и измерить его магнитное поле таким способом, каким мы обычно это делаем для звезды, результат будет очень разочаровывающим. Напряженность магнитного поля будет редко превышать 1 Гс, что примерно в 10 раз больше, чем среднее поле Земли, и сравнимо с напряженностью очень дешевого игрушечного магнита. У других звезд, например у белых карликов, очень сильное магнитное поле, в несколько тысяч гаусс. А у нейтринной звезды или пульсара поверхностное магнитное поле достигает миллиарда гаусс. Очевидно, дневная звезда мало что может предложить изучающему звездный магнетизм.

Но давайте придвинемся ближе, чтобы увидеть отчетливо диск, затем крупномасштабную структуру. В полярных областях (гелиофизическая широта более 60°) существует отчетливо выраженная структура радиального относительно поверхности магнитного поля. Это поле меняется, но медленно, характерное время изменений составляет несколько лет. Оно состоит из множества маленьких магнитных элементов, и поэтому его нельзя считать общим магнитным полем.

При помощи «Скайлэба» мы смогли получить наглядное представление о структуре магнитного поля в полярных областях. Фотографии Солнца, полученные из космоса в ультрафиолетовой области спектра, выявили ажурную структуру силовых линий, на существование которой затменные фотографии давали только слабый намек. В полярных областях силовые линии открыты и простираются в космическое пространство, и поэтому вещество легко может улететь наружу. Это область макроспикул, представляющих собой вытянутые вертикально структуры огромного объема. Свободный поток вещества вызывает появление грациозных корональных лучей, связанных с яркими корональными пятнами.

Наблюдения магнитного поля с высоким пространственным разрешением отчетливо выявили огромное число беспорядочно распределенных узелков с напряженностью магнитного поля, равной 1000 Гс и более. Полярности магнитного поля у различных узелков могут быть разными, и поэтому при усреднении магнитные поля почти вычитаются, что приводит к значению напряженности общего магнитного поля около 1 Гс. Данные указывают на существование крупномасштабной структуры магнитного поля в фотосфере, но она опять же состоит из более мелких элементов. Магнитное поле вытягивается далеко в пространство, образуя секторную структуру межпланетного магнитного поля. В каждом секторе домини-

рует одна полярность; полярности в соседних секторах различны. Эти секторы могут быть прослежены вплоть до солнечной поверхности.

Наблюдения с высоким пространственным разрешением, по-видимому, покажут, что большая часть магнитного потока в фотосфере концентрируется в ярких факельных точках, так называемых филигри, действительно образующих филигранную структуру. Эти яркие точки, подобно спикулам и волокнам, скапливаются на границах супергрануляционных ячеек. Напряженность магнитного поля внутри малых магнитных элементов, поперечный размер которых составляет 200—300 км, около 1000 Гс. Большая часть магнитного потока сосредоточена в таких ячейках.

Самые высокие значения напряженности магнитного поля, равные нескольким тысячам гаусс, наблюдаются в солнечных пятнах и в областях бурной активности. О наличии пятен на Солнце знали уже с античных времен, хотя последователи Аристотеля отказывались верить в их реальность. Из многих совершенно независимых источников древнего Востока мы знаем, что ученые проводили тщательные наблюдения солнечных пятен за сотни лет до изобретения телескопа. Они образно сравнивали их со сливами, воронами. При прозрачной земной атмосфере большие пятна нетрудно увидеть на Солнце, когда оно близко к горизонту. Однако последователи Аристотеля избегали таких наблюдений. Для них небесные объекты представляли собой верх совершенства. Поэтому Солнце — не просто сфера, а идеальная сфера и, следовательно, ни в коем случае не может быть обезображено уродливыми черными пятнами.

Эти догмы, перенесенные в европейскую мысль трудами Фомы Аквинского, чрезвычайно осложняли жизнь Галилея. Баварец Кристоф Шайнер изготовил несколько небольших телескопов и использовал их для наблюдения Солнца, спроектировав его изображение на экран. После семи месяцев наблюдений он пришел к выводу, что на сверкающем изображении Солнца видны пятна. Еще несколько человек увидели пятна на изображении Солнца, поэтому их нельзя было считать результатом оптического обмана. Пятна имели одинаковый вид при использовании различных телескопов и, следовательно, появились не из-за несовершенства линз. Шайнер исключил также влияние высоких облаков, поскольку положение пятен на Солнце не менялось при наблюдениях из различных мест. Нет, решил Шайнер, эти пятна или на Солнце, или очень близко от Солнца. В конце концов, он пришел к выводу, что это планеты или что-то подобное им и что они обращаются над диском Солнца. Он просто не мог допустить

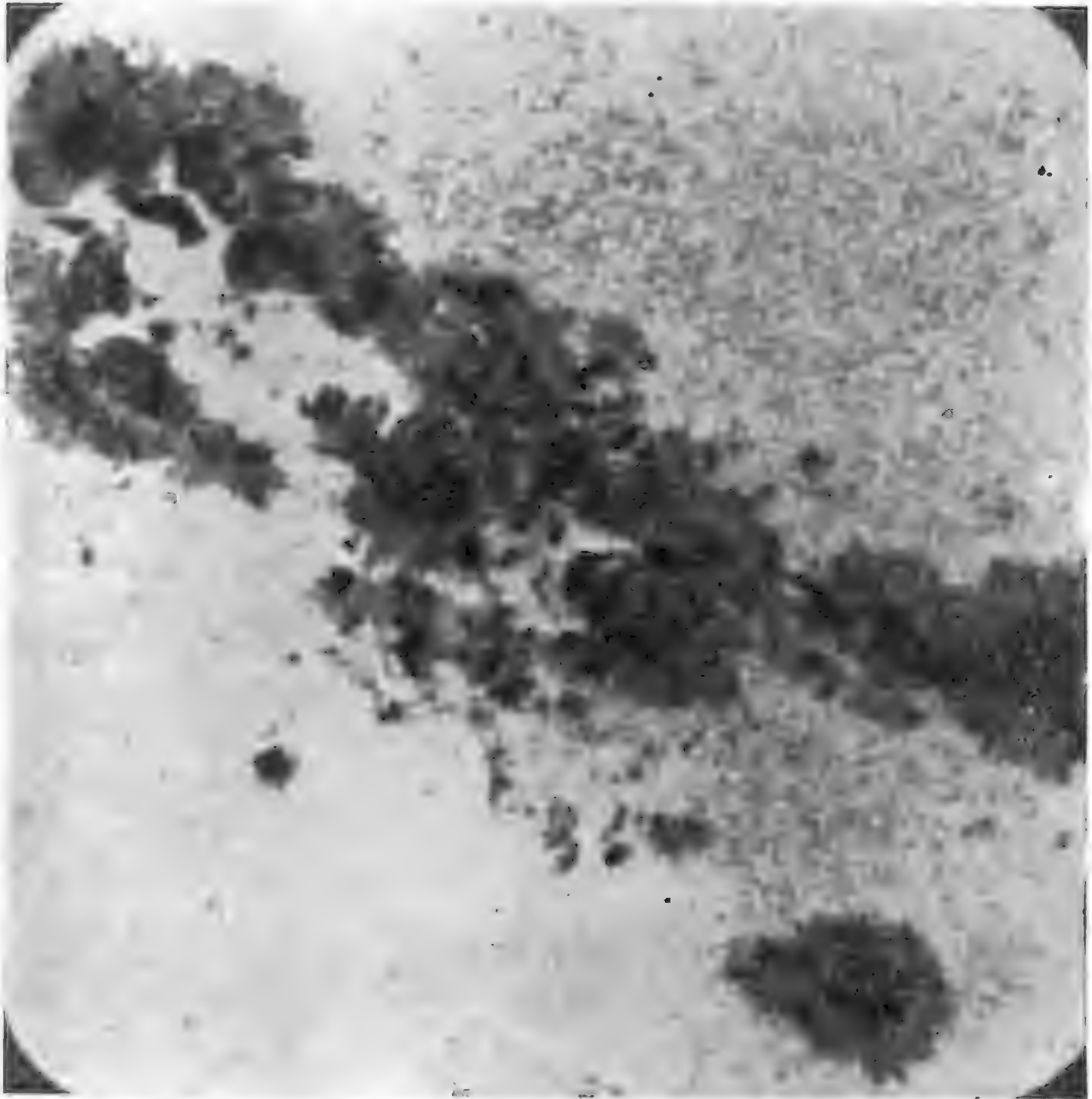
в соответствии с традиционными философскими воззрениями, что Солнце может оказаться нечистым.

Галилей услышал об открытиях Шайнера и принялся за работу. У него не было иллюзий относительно Солнца, которое он отнюдь не считал совершенным. Будучи достаточно ловким политиком, Галилей объявил о своем приоритете на открытие, утверждая, что он наблюдал солнечные пятна значительно дольше года. Но как бы там ни было, он действительно зарисовывал и регистрировал солнечные пятна и сделал много важных открытий. Он обнаружил, что они рождаются и умирают, меняют размер. Наблюдая пятна вблизи лимба, он обратил внимание на изменения формы, вызванные эффектом перспективного сокращения на сфере. Галилей был уверен, что пятна расположены на Солнце и что Солнце является сферическим телом. Однако критика Галилеем работы Шайнера привела к тому, что последний обиделся и позднее плел против него интриги.

Темная центральная часть большого солнечного пятна называется тенью, окружающая тень волокнистая серая область пятна — полутенью. Но пятна только кажутся темными, поскольку они погружены в яркую фотосферу. Если бы пятно можно было рассматривать отдельно, то мы бы увидели, что оно светится сильнее, чем электрическая дуга, так как его температура равна 4000 К, то есть примерно на 2000 К меньше температуры фотосферы. Солнечное пятно средних размеров на фоне темного неба казалось бы таким же ярким, как Луна в полнолуние.

Вильям Гершель полагал, что солнечные пятна представляют собой реальные дыры в горячей атмосфере Солнца. Темная центральная часть пятна, тень, по его мнению, — обитаемая планета, расположенная под солнечной огненной поверхностью. Вот что Гершель писал относительно обитаемости дневной звезды в 1795 году: «Солнце, по-видимому, не что иное, как самая заметная большая и светлая планета, очевидно первая среди всех остальных; говоря строже, единственная главная планета, все остальные на самом деле по сравнению с ней второстепенны. Она похожа на другие планеты Солнечной системы своей твердостью, атмосферой, разнообразием форм поверхности, вращением вокруг собственной оси, тем, что на нее падают тяжелые тела. Это заставляет нас предположить, что, по всей вероятности, она, так же как и другие планеты, населена существами, чьи органы приспособились к особым условиям этой огромной планеты».

То, что пятна представляют собой углубления на поверхности Солнца, было установлено больше двадцати лет тому назад благодаря исследованиям Вилсона. Он наблюдал по-



Выдающаяся по размерам и сложности группа солнечных пятен. Темная внутренняя часть пятна называется «тенью», а окружающая пятно область с волокнистой структурой — «полутенью». Заметна также солнечная грануляция. (Обсерватория Сакраменто-Пик, США.)

степенное изменение формы симметричного пятна при его приближении к краю Солнца. Вблизи края исчезает темная тень пятна. На основании наблюдений был сделан вывод, что пятно представляет собой углубление в форме воронки. Расчеты показали, что тень пятна в среднем лежит ниже уровня фотосферы на 700 км.

Темная область тени покрывает примерно $1/5$ площади пятна средних размеров. Внутри тени заметна активность. Так, при самых хороших условиях наблюдений можно обнаружить яркие точки внутри тени диаметром обычно около 100 км. Они живут всего несколько минут. Наблюдаются не очень сильные всплески яркости, возможно связанные с наличием магнитогидродинамических волн в нижних слоях тени. Пятно может также действовать как резонансная по-

лость; об этом свидетельствуют обнаруженные в тени колебания.

Серая полутень кажется состоящей из радиальной сетки ярких волокон, видимых на темном фоне. Такая структура видна даже при помощи небольшого телескопа. Попробуйте проследить развитие солнечных пятен в течение нескольких последовательных дней, пользуясь методом проекции, о котором говорилось выше.

Именно изучение солнечных пятен выявило тот факт, что Солнце на экваторе вращается быстрее, чем на полюсах. Если вы обнаружили исчезновение солнечных пятен за краем диска, то примерно через 14 дней вы сможете их снова увидеть на противоположном краю. Средний период вращения солнечных пятен, наблюдаемый с Земли, составляет 27,28 дня, причем на экваторе пятна движутся немного быстрее среднего, а на широтах в 40° немного медленнее.

Как возникают солнечные пятна, откуда они берутся? На такой вопрос с физической точки зрения не так просто ответить. Мы рассмотрим эту проблему в следующей главе. Здесь же опишем кратко, как выглядит развитие группы солнечных пятен на поверхности Солнца. В возмущенной области фотосферы появляются темные поры. Процесс возникновения пор занимает около часа, и они исчезают примерно через день, если не разовьются в настоящие пятна. Никто пока не знает, почему поры появляются, где и когда они образовались. Поры или маленькие пятна обычно (но не всегда) превращаются в пару солнечных пятен. Вначале эти пары располагаются параллельно солнечному экватору. Ведущее, или головное, пятно обычно более компактно и движется немного быстрее, чем хвостовое пятно. Часто в промежутке между двумя основными пятнами появляются маленькие пятна. Если это произойдет, то хвостовое пятно может исчезнуть, остается только лидер (головное пятно), медленно уменьшающееся в размерах. Пятна могут иметь различные формы и размеры. Большинство пятен больше Земли; редко, может быть раз в 10 лет, а то и того реже, большая и сложная группа распространяется на одну пятую часть диска. Пятна, размер которых больше 40 000 км, можно увидеть невооруженным глазом, когда Солнце очень близко к горизонту (правда, это не совсем безопасно). Время жизни группы солнечных пятен — от нескольких дней до многих месяцев. В 1946—1947 гг. наблюдались самые большие пятна со времени изобретения телескопа; площадь одного из этих гигантов составляла 10^{10} км².

С солнечными пятнами связано другое образование на поверхности Солнца — факелы. Факелы имеют вид областей,

яркость которых выше яркости обычной фотосферы. Яркие, с хорошо развитой структурой факелы часто окружают солнечные пятна. Использование узкополосных фильтров позволяет получить фотоснимки, на которых видны только факелы без фотосферы. Структуру фотосферных факелов можно проследить на всех уровнях солнечной атмосферы, но с увеличением высоты факелы расплываются, становясь более диффузными. На фотографиях факелы лучше видны вблизи лимба, где перспектива подчеркивает контраст. Время жизни факелов короче, чем пятен, и составляет в среднем несколько часов.

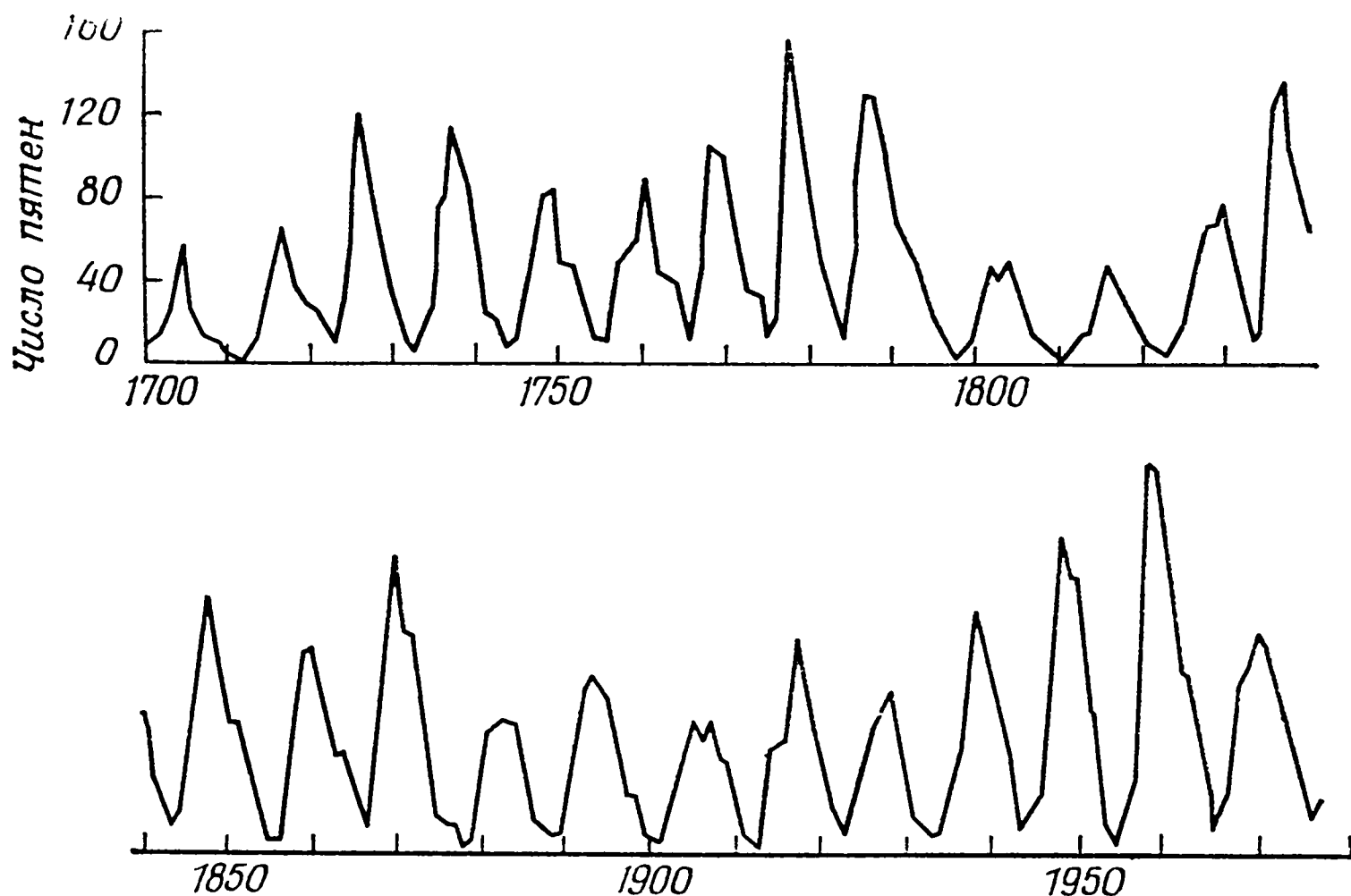
Космическая астрономия дала новые ценные сведения о солнечных пятнах и связанных с ними явлениях атмосферы. Одним из результатов является обнаружение прямого влияния солнечных пятен на атмосферу Солнца вплоть до короны. На фотоснимках, полученных в космосе, видны арочные структуры, расположенные между пятнами, температура которых, равная примерно $300\,000\text{ K}$, намного меньше температуры чрезвычайно горячей короны ($2 \cdot 10^6\text{ K}$). Благодаря такой низкой температуре они и видны на фоне прозрачной короны.

В фотосфере и под фотосферой происходит так много разнообразных физических процессов, что пройдет еще немало времени, пока мы полностью в них разберемся. Физики и астрономы являются ежедневными свидетелями происходящей здесь зачаровывающей борьбы между силами давления горячего газа и запутанными магнитными полями, в то время как солнечное излучение прокладывает себе путь к остальной Вселенной. Плазма с температурой в сотни тысяч градусов взлетает вверх или скользит вниз из короны. Темные пятна рождаются и умирают. Это настоящий рай для физиков: они могут следить, как силы природы стараются переиграть друг друга в битве, которая должна длиться 10 млрд. лет, в битве, в которой победить может только гравитация.

Активность и солнечный цикл

Солнечные пятна — один из типичных примеров «погоды» в фотосфере и атмосфере Солнца. Понятие «активное Солнце» включает в себя также вспышки, протуберанцы — гигантские языки газа, вырывающиеся в корону, а также всплески шумового радиоизлучения. Все это — примеры энергосвободения, которое происходит при не очень сильном нарушении устойчивости внешних слоев Солнца. Часто причиной таких нарушений является очень сильная скрученность магнитного поля. Колебательная природа магнитного поля — его скручивание и последующее раскручивание — дает ключ к пониманию мощных всплесков энергии на Солнце. В отличие от планеты Земля дневная звезда обращается с магнитным полем, как с игрушкой, закручивая его все плотнее и плотнее до тех пор, пока в конце концов оно не срывается, подобно перекрученной часовой пружине. Название «солнечный цикл» относится к почти регулярным сериям наблюдаемых на Солнце изменений, которые сопровождают процесс наматывания и последующего освобождения магнитного поля. Эта интригующая картина поведения поля на Солнце впервые привлекла внимание астрономов при наблюдениях солнечных пятен.

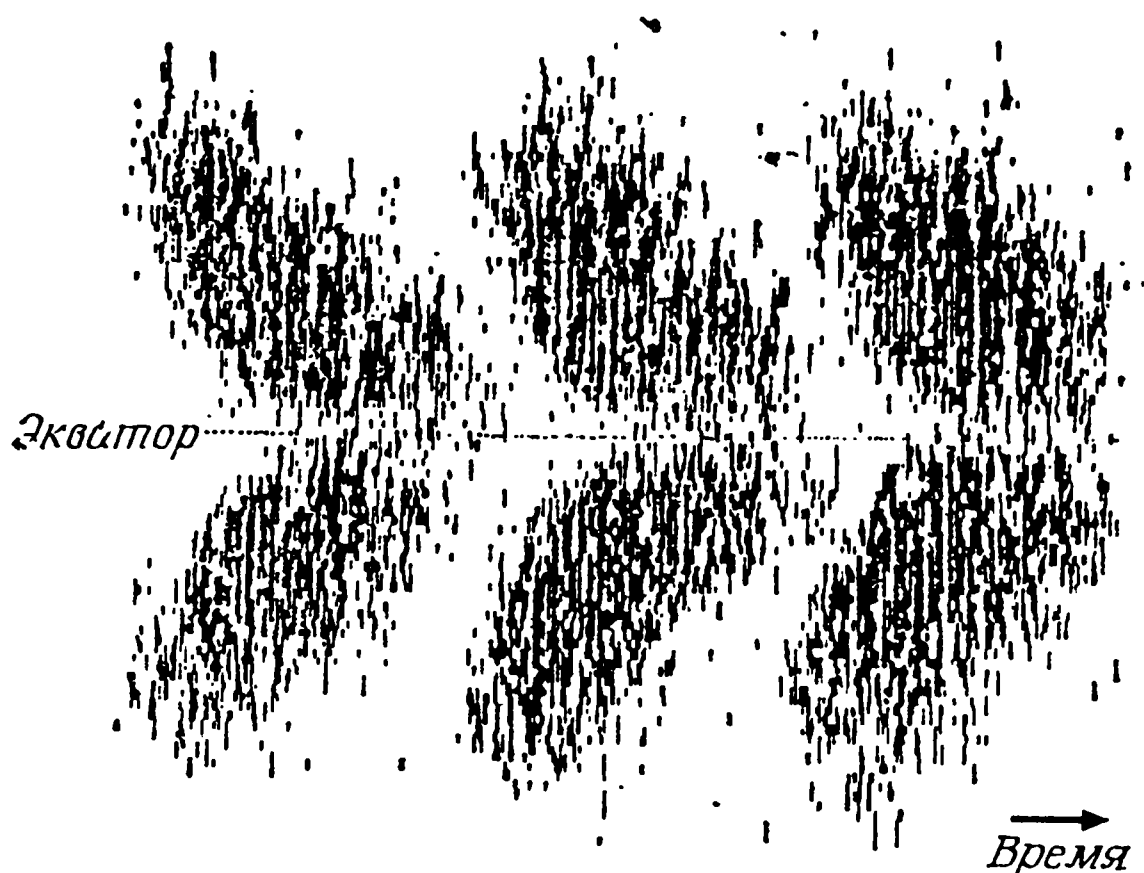
Наблюдения солнечных пятен, используемые для научных исследований, астрономы проводят в течение почти трех последних столетий. Некоторые элементарные сведения о пятнах можно отыскать и в более отдаленном прошлом. Галилей проводил свои наблюдения в 1610—1611 гг., и с этого периода регистрация пятен то проводилась, то прекращалась, то возобновлялась вновь. К 1843 г. Г. Швабе из Дессау собрал достаточно много данных для того, чтобы подтвердить долгое время существовавшее предположение о регулярных флуктуациях числа солнечных пятен. Швабе показал, что число пятен на диске меняется циклически, достигая максимума примерно через каждые одиннадцать лет. Следующим, кто внес существенный вклад в исследование солнечных пятен, был Р. Вольф, который в середине XIX столетия собрал все, какие только мог, данные о пятнах и привел их к удобному виду. Он установил, что средний период цикла равен 11,1 года.



Изменения числа солнечных пятен (чисел Вольфа) за достаточно длинный промежуток времени не только выявляют 11-летний цикл пятен, но и указывают на возможное присутствие цикла, с периодом около 80 лет.

Для того чтобы придать смысл субъективному суждению о степени запятненности Солнца, определение числа солнечных пятен, данное Вольфом, используется до сих пор. Это число, определяющее меру солнечной запятненности, принимает во внимание как число групп солнечных пятен, так и число самих пятен, наблюдавшихся в данный день. Каждая группа принимается за десять единиц, а каждое пятно — за единицу. Общий отсчет за день — число солнечных пятен Вольфа; оно может быть и столь малым, как нуль, и столь большим, как 200. На каком основании Вольф выбрал для группы значение, равное десяти? Он должен был что-то выбрать — и в этом вся причина; хотя у его выбора нет физической основы, но схема разумна и позволяет за счет введения бóльшего веса для групп пятен учитывать степень объединения пятен в группы. Качество пудинга определяется на вкус — вот почему астрономы до сих пор пользуются системой Вольфа. И последнее, что следует упомянуть: существует система корректировки числа пятен (несколько напоминающая гандикап, используемый на бегах, или раунд в гольфе), с помощью которой учитываются отличия в индивидуальных свойствах наблюдателей, различие в оборудовании и погодных условиях.

Кривая среднемесячного числа солнечных пятен совершенно отчетливо показывает периодическое изменение числа



Маундер построил диаграмму, показывающую зависимость широты солнечных пятен от времени (в солнечном цикле). Характерная форма диаграммы бабочек Маундера свидетельствует, что пятна постепенно смещаются к экватору. Отдельное пятно не движется; изменяется лишь средняя широта, на которой появляются пятна.

солнечных пятен. За последние 50 лет течение цикла несколько ускорилось (хотя и незначительно) и цикл уменьшился примерно до 10,5 лет. Усреднение за 200 лет дает период в 11,2 года. За последние 300 лет самый короткий период был равен 7 годам, самый длинный — 17. Другими словами, поведение цикла регулярно лишь в среднем. Если посмотреть на изменение чисел солнечных пятен за три столетия, то можно заметить, что в подъеме и спаде максимумов, по-видимому, существует некоторая система. Возможно, это указывает на то, что существует другой цикл, равный примерно 80 годам, который модулирует одиннадцатилетний и о котором мы в действительности ничего не узнаем в течение ближайших нескольких сотен лет. Заметим также, что подъем до вершины максимума занимает меньше времени (примерно четыре года), чем спад, который обычно продолжается около шести лет.

Хотя система счета Вольфа хорошо выдержала испытание временем, сегодня более разумно измерять солнечную активность количественными методами. Это именно то, чем занимаются в настоящее время обсерватории, которые ведут регулярные патрульные наблюдения за Солнцем, используя в качестве меры активности оценку площадей солнечных пятен в миллионных долях площади видимой солнечной полусферы.

Одновременно с возрастанием числа солнечных пятен сами пятна также мигрируют в направлении солнечного экватора, который наклонен к плоскости орбиты Земли (т. е. к эклиптике) под углом в 7° . Г. Шпёер (1822—1895) из Потсдамской обсерватории был первым, кто исследовал эти изменения с широтой. Он и Ричард Кэррингтон (1826—1875) — английский астроном-любитель, сделавший очень много для солнечной астрономии, провели большие серии наблюдений периодов обращения пятен. Исходя из этих наблюдений, они подтвердили тот факт, что Солнце не вращается как твердое тело. Они обнаружили, что на широте 30° , например, период обращения пятен вокруг Солнца на 7% больше, чем на экваторе.

Е. Уолтер Маундер, суперинтендант Королевской обсерватории в Гринвиче (Лондон) в 1904 г. опубликовал интересную диаграмму, выявляющую миграцию солнечных пятен по широте в течение солнечного цикла. Эта «диаграмма бабочек» отчетливо показывает постоянное смещение пятен от высоких широт к более низким. Обычно первые пятна нового цикла появляются примерно на гелиоширотах $\pm 30^\circ$, хотя они могут появляться и выше, вплоть до $\pm 40^\circ$. По мере прохождения цикла пятна появляются все ближе к экватору. Они достигают $\pm 15^\circ$ в максимуме числа солнечных пятен и в конце цикла образуют сгущение на диаграмме вблизи широты $\pm 5^\circ$. Отметим, что эти пятна не движутся в направлении экватора, в действительности смещается лишь место наиболее вероятного появления пятен. В конце цикла вблизи экватора могут существовать пятна старого цикла, в то время как на высоких широтах уже возникают пятна нового цикла.

В 1908 г. Джордж Эллери Хейл открыл магнетизм солнечных пятен. В 1950-х годах Бэбкоки, используя более совершенный магнитограф, показали, что в солнечных активных областях существуют биполярные магнитные поля. Поведение магнитных полей в солнечных пятнах дает нам ключ к пониманию природы механизма, управляющего солнечной активностью. Измерения магнитного поля в группах, состоящих из двух солнечных пятен, отчетливо показывают, что эти два пятна имеют противоположные полярности, указывая на то, что линии магнитного поля выходят из одного пятна и входят в другое. В течение отдельного солнечного цикла и в данной полусфере ведущее пятно (ведущее в направлении солнечного вращения) всегда одной и той же полярности. В противоположной полусфере по другую сторону экватора выполняется то же самое, но знак полярности обратный. Это поведение сохраняется в течение всего

солнечного цикла, а затем, когда включается новый цикл, полностью меняется на противоположное. Конец одного цикла солнечных пятен и начало следующего сопровождаются сменой знака солнечных магнитных полей, при которой даже слабое общее поле медленно меняет направление на противоположное. Этот процесс занимает около года. Таким образом, магнитный цикл Солнца составляет полных двадцать два года плюс — минус несколько месяцев.

Хотя солнечные пятна являются единственным признаком активности, наблюдаемым невооруженным глазом, солнечная активность — значительно более широкое понятие. Активная область на Солнце — чрезвычайно возмущенная зона, часто (хотя и не всегда) связанная с солнечными пятнами, — это область, где происходят многие явления активности: факелы, вспышки, протуберанцы и т. д. Единственное, что связывает все эти явления воедино, это интенсивное магнитное поле, достигающее нескольких тысяч гаусс. В действительности активные области, размеры которых составляют от 10 000 до 500 000 км, представляют собой наиболее поразительное свидетельство магнитной жизни Солнца.

Факелы — это области в фотосферных слоях, которые кажутся яркими на фотоснимках в белом свете и снимках, полученных через фильтр. Вблизи молодых и развитых активных областей факелы плотные и яркие. Гевелий в XVII столетии, по-видимому, был первым солнечным наблюдателем, который заметил факелы. Тесно связаны с факелами флоккульные области; они наблюдаются в хромосфере и сливаются с внутренней короной. Для активных областей могут быть построены карты распределения эмиссии в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Одной из наиболее важных задач орбитальных обсерваторий как раз и является получение снимков в ультрафиолетовом и рентгеновском излучении. В этих диапазонах изображение активной области расплывается и имеет менее четкую структуру, однако она все еще ограничена магнитным полем.

Бушующая хромосфера — это именно та область, в которой многие из эффектов солнечной активности проявляются наиболее резко. Эту область и неустойчивые слои над ней нелегко исследовать с поверхности Земли, поэтому столь важной задачей исследований на «Скайлэбе» и других спутниковых программ было изучение солнечной активности. Многие из событий наиболее хорошо исследованы в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах излучения потому, что их бурное развитие проявляется главным образом на этих длинах волн. Исследование солнечных пятен и больших активных областей было нетрудной задачей для «Скайлэба».

Транзиентные же и взрывные явления потребовали уже более тщательных наблюдений с космического корабля и наземных обсерваторий. Эти совместные наблюдения позволили получить значительно более ясную картину возмущений в хромосфере и короне.

По данным о солнечных пятнах и активных областях может быть построена модель активности, но мы подчеркиваем, что это именно модель, а не законченная теория. Фактически мы пытаемся объяснить механизм формирования «погоды» во внешних слоях Солнца таким же образом, каким метеорологи объясняют области пониженного и повышенного давления, фронты в атмосфере Земли. С точки зрения теории и прогноза метеорологи значительно опередили астрономов-солнечников. Это едва ли удивительно, так как понимание механизма формирования «погоды» на «космическом корабле» Земля для человечества гораздо важнее исследований Солнца.

Еще существеннее то, что солнечная «погода» связана с горячей плазмой — материей, которую трудно чем-либо удержать и которая течет вдоль силовых линий магнитного поля, что приводит к проблемам большой математической сложности. С другой стороны, недостаточность понимания нами активности не является серьезным ограничением в отношении исследования Солнца как звезды, так как даже наиболее сильные солнечные бури меняют выход энергии Солнца лишь на одну миллионную долю, а это не может изменить общей картины его эволюции.

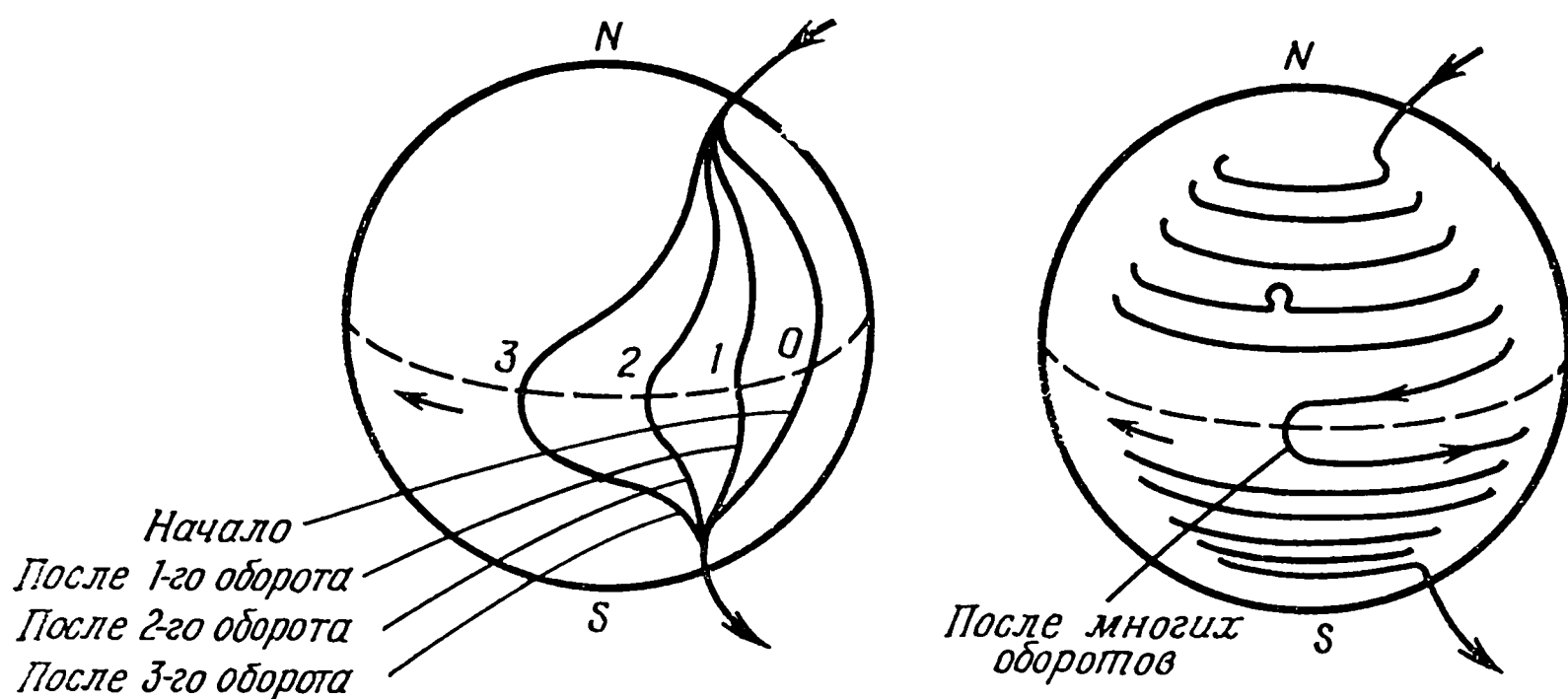
В настоящее время широко принято, что солнечная активность своим происхождением обязана магнитному полю и что она возникает вследствие того, что Солнце не вращается как жесткое тело. Наблюдения показывают, что экваториальная зона постоянно опережает при своем вращении полярные области. Возможно, хотя не существует ни доказательств, ни отрицания этого утверждения, внутренние слои Солнца вращаются быстрее внешних. К чему это нас приводит?

Прежде всего, нам необходимо уяснить одну важную мысль, а именно ту, что солнечное вещество горячее, вследствие чего в нем существует много свободных электронов, образующихся в результате частичной ионизации атомов. Это происходит лишь при очень высокой температуре. Электроны образуют электрический ток; вещество же, содержащее свободные электроны, является хорошим проводником электричества, подобно железу и меди. (Свободные электроны существуют в холодных металлах благодаря тому, что атомы в металлах образуют кристаллическую решетку. Это приводит к разделению положительно заряженных атомов и свободных

электронов.) Когда электрически заряженное вещество, имеющее высокую проводимость, пытается двигаться в направлении, противоположном направлению магнитного поля, обнаруживается, что сделать это оно не может. В том случае, если оно все же пытается перемещаться, поле создает электрические токи, которые текут таким образом, что возникающая вторичная магнитная сила противодействует движению. Если эти рассуждения смущают Вас, можно посмотреть на все и иначе: когда облако электронов перемещается относительно магнитного поля, они автоматически генерируют дополнительное магнитное поле, которое, вместо того чтобы ускорять движение, противодействует ему. Если бы это было не так, то сейчас весь транспорт и энергетика Земли обеспечивались бы машинами, работающими по принципу вечного двигателя.

Что же касается Солнца, то на Солнце магнитное поле захватывается горячим веществом или вмораживается в него. При своем движении солнечное вещество увлекает за собой столько магнитного поля, сколько сможет. Так как экватор при вращении опережает полюса, силовые линии магнитного поля растягиваются, но в отличие от спагетти линии поля при таком наматывании не обрываются; они скорее похожи на чрезвычайно эластичную резину. Как и у резины, чем больше они растягиваются, тем больше в них запас энергии. Для начала возьмем простую модель Солнца: чисто дипольное поле, как, например, у обычного стержневого магнита, с невозмущенными силовыми линиями, соединяющими полюса. Затем заставим его вращаться, причем вещество на экваторе пусть вращается быстрее, чем вещество на более высоких широтах. Через несколько десятков оборотов линии первоначального простого поля обмотаются несколько раз вокруг Солнца. Этот процесс продолжается и далее, и каждый раз, когда экватор совершает один оборот относительно полюса, магнитные тиски вокруг Солнца сжимаются сильнее, стягивая силовые линии все теснее и теснее. Более того, то, что когда-то было магнитным дипольным полем, постепенно превращается в сильное поле, по форме напоминающее пончик (или тороидальное поле). Силовые линии теснят друг друга. В конце концов какое-то из полей (дипольное или тороидальное) должно уступить.

Когда напряженность поля в какой-либо части внешних слоев достигает примерно 10 000 Гс (это приблизительно в 100 000 раз больше напряженности поля Земли), магнитное давление становится достаточно сильным для того, чтобы уравновесить силу солнечного притяжения. Теперь плазма закручивается и свивается в жгуты, запутывая силовые ли-



Дифференциальное вращение Солнца постепенно наматывает силовые линии магнитного поля.

нии еще больше, благодаря перемешиванию внешних слоев за счет конвекции. Поле запутывается в виде беспорядочно переплетающихся жгутов или узлов. Местами оно прорывается через фотосферу, образуя области всплывающего потока, которые являются первой стадией образования солнечной активной области. Линии нового магнитного поля таким образом поднимаются на поверхность Солнца. Области, в которых они выходят на поверхность, имеют биполярную структуру в виде пары северного и южного магнитных полюсов. Впервые биполярная структура наблюдалась в солнечных пятнах в начале XX столетия. Эта стадия может сопровождаться яркой флоккулярной областью. Примерно через день возникает и сама пара солнечных пятен, и оба пятна связывает арочная структура волокон, которая, по-видимому, очерчивает структуру магнитного поля. Эти арочные волокна могут достигать в длину 30 000 км и иметь высоту, равную 5 000 км, другими словами, могут быть много больше Земли.

Внутри области, занятой солнечными пятнами, магнитное поле в виде трубки выходит из одного пятна и, образуя арку, входит в другое. Эта картина естественным образом объясняет двойную полярность и также хорошо согласуется с наблюдениями арочных волокон. Наблюдения с космических аппаратов, особенно наблюдения активных областей, позволяют теперь проследить эту структуру и значительно выше фотосферы.

В конце 1960-х гг. Спенсер Р. Вирт детально исследовал возникновение новых активных областей на Солнце. Использование метода киносъемки, показывающего развитие активной области на Солнце в ускоренном темпе, позволило

ретроспективно проследить развитие солнечного пятна вплоть до первых нескольких часов его появления. Одним из удивительных открытий было то, что всплывающая из-под солнечной поверхности арка магнитного поля первоначально образует произвольный угол по отношению к экватору. Однако через несколько часов под действием магнитного поля и за счет перестройки силовых линий всплывающая трубка разворачивается и занимает нужное положение. Таким образом обеспечивается параллельность пары солнечных пятен по отношению к экватору на Солнце. Тот факт, что ориентация трубок на более ранних стадиях почти случайна, предполагает, что магнитное поле под поверхностью может представлять собой хаотическое переплетение силовых линий.

Когда всплывает арка магнитного поля новой группы пятен, она разворачивается и занимает нужное положение. Асимметричный характер области солнечных пятен может возникать следующим образом. Если всплывающее магнитное поле нуждается лишь в небольшом повороте, группа пятен растет. Когда же это поле необходимо повернуть на большой угол, «неправильное» пятно (пятно с обратной полярностью) больше, и группа вскоре исчезает. По этой причине почти у всех в действительности наблюдаемых пятен предшествующее пятно больше; другие группы просто не выживают.

«Скайлэб» впервые дал астрономам возможность исследовать протяженные структуры активных областей, простирающиеся в верхнюю хромосферу и нижнюю корону. Наблюдения, проводившиеся одновременно на нескольких «невидимых» длинах волн, выявили тонкую структуру в области, лежащей непосредственно над активной областью в фотосфере. Наиболее важным открытием было то, что активные области, несомненно, определяются арочными магнитными трубками. Внутри этих трубок, упирающихся своими основаниями в солнечную поверхность, удерживается высокотемпературное вещество.

В максимуме солнечной активности новые области появляются из-под фотосферы с частотой одной области в день. Они всплывают на поверхность за счет конвекции в центре супергрануляционных ячеек.

Гелиофизиков до сих пор занимает проблема относительно более низкой температуры внутри солнечных пятен. Вне всякого сомнения, в пятне работает мощный процесс охлаждения, который отводит тепло от пятна столь эффективно, что температура падает почти на 2000 К. Существует несколько возможных объяснений этого. Одно из них заключа-

ется в том, что сильное магнитное поле, захваченное опускающимся вниз под фотосферу веществом, может в значительной степени замедлить процесс конвекции и таким образом создать изолирующий слой под пятном, резко уменьшив приток энергии. Аналогично действует изолирующее перекрытие из стекловаты или минерального волокна, уменьшающее число оборотов больших конвективных ячеек непосредственно под перекрытием крыши. Зимой снег медленнее всего тает на хорошо изолированных крышах из-за того, что они самые холодные. Другое возможное объяснение состоит в том, что над пятнами вещество, быстро растекаясь, охватывает большую площадь, вследствие того, что стекает вдоль силовых линий. Это растекание плазмы должно приводить к локальному охлаждению фотосферы. И наконец, существует предположение о том, что над пятном генерируются магнитно-гидродинамические волны и что они могут накачивать энергию вверх в корону. Теории, теории, теории...; какая же из них верна? Может быть, их комбинация? Все теории имеют свои трудности, одной из которых является то, что энергию, уносимую из пятна, явно не удастся обнаружить где-либо в другом месте. Если модель изолирующего слоя верна, почему мы не видим вокруг края пятна ярких колец, через которые должно уходить отклоняемое тепло? И аналогично, если существует какой-то механизм накачки, то следовало бы ожидать, что в короне будут видны яркие точки. В конце концов, холодильники и морозильники должны иметь теплообменник или вентилятор для того, чтобы избавиться от ненужного тепла.

Во время солнечного цикла новые пятна впервые возникают на широтах $\pm 40^\circ$, там, где, как полагают ученые-солнечники, происходит первоначальный сдвиг магнитной структуры. Магнитная плавучесть выносит поле из нижней конвективной зоны с глубины 200 000 км. Этот вынос поля приводит к переносу давления в более высокие широты. Однако дифференциальное вращение продолжает наматывать силовые линии все ближе к экватору, в результате чего пятна также постепенно приближаются к экватору. На конечной стадии цикла силовые линии на экваторе настолько сближаются, что происходит «короткое замыкание», уничтожающее большую часть магнитного поля. Новый цикл начинается с движения силовых линий в противоположном направлении — поле одного знака навстречу полю другого знака — из-за того, что динамо-поле Солнца меняет свое направление в конце цикла на противоположное. Когда возникают первые пятна нового цикла, их полярности также противоположны полярностям пятен предшествовавшего цикла.

В объяснении того, каким образом действует солнечное динамо, существуют значительные трудности. Кроме того, решение этой проблемы должно учитывать и другой неизвестный фактор — не вращается ли Солнце внутри быстрее? В течение некоторого времени в начале 1970-х годов казалось, что у Солнца действительно есть быстро вращающееся ядро, однако, когда не удалось обнаружить сжатие (сплюснутость к полюсам), которое должно было бы возникать в случае быстро вращающегося ядра, это представление было поставлено под сомнение.

Проблемы, связанные с вариациями магнитного поля Солнца, было бы легче решить, если бы эти вариации были регулярными, но даже эта регулярность была поставлена под сомнение поразительными результатами, полученными при тщательном изучении исторических записей. Эти записи показывают, что солнечные пятна не всегда появлялись и исчезали таким же образом, как в течение последних 250 лет. В 1976 г. астроном Джон Эдди просмотрел записи, в которых упоминались солнечные пятна за последние 1000 лет, и пришел к выводу, что Солнце в течение этого периода претерпевало значительные изменения, заслуживающие самого пристального критического рассмотрения.

Ключевая информация о существовании реальных изменений была получена следующим образом. Галилей и Шайнер наблюдали изменения на Солнце в 1610—1611 гг., но прошло 230 лет, прежде чем Генрих Швабе обнаружил отчетливый период, разделяющий максимумы; на первый взгляд столь длительный период, потребовавшийся для открытия солнечного цикла, едва ли делает честь первым исследователям Солнца. В конце XIX столетия два наблюдателя — Гюстав Шперер в Германии и Е. В. Маундер на Гринвичской обсерватории (Англия) в пяти научных работах указали на тот факт, что в течение 70-летнего периода вплоть до 1716 г. пятен на солнечном диске, по-видимому, почти не было. В течение примерно половины этого времени, т. е. с 1672 по 1704 г., на северной полусфере Солнца практически никаких пятен вообще не было видно. Что касается групп солнечных пятен, то за шестьдесят лет, предшествовавших 1705 г., была замечена лишь одна. Маундер, имевший то преимущество, что он следовал за Шперером во многих из этих исследований, смог поддержать эти утверждения ссылкой на научную литературу того периода. Эдди, обратившись вновь к работам того периода, цитирует статью, опубликованную Лондонским королевским обществом. В ней говорится следующее о наблюдении в 1671 г. солнечного пятна: «...в Париже Высокочтимый синьор Кассини недавно

вновь обнаружил Пятна на Солнце; насколько мы знаем, ни одно из них не наблюдалось в течение уже многих лет». Кассини писал, что его открытие было сделано через двадцать лет после того, как астрономы в последний раз видели значительные пятна на Солнце. И заключительный аккорд был взят в 1684 г. английским Королевским астрономом Флемстидом, который следующим образом сообщил о появлении пятна: «Эти явления, столь частые в дни Шайнера и Галилея, были за последнее время столь редкими, что данное появление — единственное, наблюдавшееся мною на его диске с декабря 1676 г.». В действительности к тому времени, когда Маундер обратился к этому вопросу, в литературе существовало уже много упоминаний о пропавших пятнах.

Свой анализ Маундер основывал главным образом на довольно скудных архивных данных и, что более сомнительно, на только кажущемся правильным доводе о том, что отсутствие свидетельств есть свидетельство отсутствия. Приняв во внимание многие ранее не рассматривавшиеся факты, Джек Эдди заново проанализировал все данные и пришел к выводу, что минимум Маундера действительно имел место, а не обязан своим происхождением ошибочным или неполным наблюдениям. Так, например, было обнаружено, что в начале XVIII века, когда вновь появились пятна, число регистраций появления полярных (северных) сияний внезапно возрастает; в настоящее время астрономы установили, что полярные сияния значительно ярче тогда, когда на диске много пятен.

Новейшее подтверждение длительных промежутков спада солнечной активности следует также из исследований содержания в прошлом тяжелого радиоактивного изотопа углерода, известного под названием углерод-14. Этот изотоп входит в состав двуокиси углерода земной атмосферы, которая, поглощаясь растениями и деревьями, становится частью их древесной ткани. Когда спокойны как «погода на Солнце», так и его магнитное поле, интенсивность потока заряженных частиц, которые носят название космических лучей и постоянно пронизывают всю нашу Галактику, у Земли больше. Если Солнце магнитоактивно — на нем много пятен, и возросшее магнитное поле до некоторой степени экранирует Землю от галактических космических лучей. Космические лучи, проникая в нашу атмосферу, при своем столкновении с другими атомами воздуха создают углерод-14. В конечном счете, меньшая солнечная активность и более слабое магнитное поле будут соответствовать большему количеству углерода-14

из-за того, что в этом случае увеличивается число столкновений космических лучей с атомами атмосферы Земли. По существу, измеряя количество углерода-14 в годовых кольцах деревьев, ученые находят, каким образом его естественное содержание изменялось в прошлом. Когда эти исследования впервые были проведены, ученые были озадачены продолжительным ростом содержания углерода-14 между 1650 и 1700 годами. Теперь мы видим, что эта аномалия тесно связана с маундеровским минимумом солнечных пятен.

Факты, подтверждающие реальность маундеровского минимума, а также убедительные свидетельства о более ранних понижениях солнечной активности, были получены из исследований исторических описаний и астрономических трактатов Востока. Эта работа была, в частности, проведена двумя английскими астрономами — Дэвидом Кларком и Ричардом Стефенсоном. Хотя в европейских источниках нет почти никакого упоминания о солнечных пятнах до Галилея, иначе обстоит дело на Востоке, откуда до нас дошла целая россыпь наблюдений. В чем причина такого различия? В Европе ученые того времени считали, что Солнце совершенно, и поэтому сама возможность существования солнечных пятен исключалась на основании теоретических (точнее, догматических) предпосылок. На Востоке это ограничение на оригинальную мысль не было господствующим, и, как следствие этого, существует множество живописных и поэтических упоминаний о наблюдавшихся невооруженным глазом солнечных пятнах. Вот примеры, взятые из переводов Кларка и Стефенсона: «Солнце было ослепительно красным, как пламя. На диске его был виден трехногий ворон. Его очертания были резкими и отчетливыми. Через пять дней он исчез» (352 г. н. э.). «На восходе Солнца и перед самым закатом на диске его было видно темное пятно размером с куриное яйцо; через четыре дня оно исчезло» (579 г. н. э.). Это прекрасный пример того, насколько легче пятна наблюдаются невооруженным глазом тогда, когда Солнце находится вблизи горизонта и светит сквозь темную дымку. Восточные описания за период в 1500 лет содержат много живописных оценок размеров пятен: «подобно сливе», «величиной с финик», «размером с монету» (28 г. до н. э.), или «черный туман, подобный летящей сороке». Эти характеристики не содержат никакой количественной оценки, тем не менее группа в виде летящей сороки (188 г. н. э.) существовала в течение нескольких солнечных оборотов («...через несколько месяцев он постепенно исчез»), так что она, должно быть, была громадной.

Восточные записи, по-видимому, указывают на два любопытных спада активности продолжительностью примерно в 200 лет. Один, в течение которого не было зарегистрировано невооруженным глазом ни одного солнечного пятна, продолжался от 600 г. н. э. до 800 г. н. э.; другой, во время которого лишь дважды наблюдались пятна, — с 1400 г. н. э. до 1600 г. н. э. Интересно, что период в 20 лет, предшествующих 1400 г. н. э., содержит множество сообщений о солнечных пятнах, что говорит о том, что солнечная астрономия в то время процветала. Кроме этих двух подозрительных пауз существуют еще три более короткие, которые своим происхождением, возможно, обязаны скорее отсутствию энтузиазма наблюдателей, чем реальному отсутствию пятен. Действительно же выдающейся особенностью больших спадов активности является их совпадение с соответствующими максимумами содержания углерода-14 в атмосфере. Еще один спад, с 1280 до 1350 г. н. э., также сопровождается возрастанием содержания углерода-14; это отклонение от нормы называется малым средневековым минимумом. Спад с 1400 г. н. э. до 1660 г. н. э. — минимумом Шпёрера, а тот, что следует за изобретением телескопа — маундеровским минимумом.

Открытие продолжительных периодов, свободных от солнечных пятен, примерно за два тысячелетия солнечных наблюдений подрывает уверенность в том, что дневная звезда имеет регулярный 11-летний цикл. Несомненно, действует другой заметный эффект — эффект, который может «выключать» пятна и уменьшать магнитное поле. Это явление подтверждается исследованиями содержания углерода-14 в ископаемых остатках растений и в особенности в кольцах деревьев. Дополнительное подтверждение следует из более косвенных наблюдений: в тех случаях, когда мала активность, протяженность короны во время солнечного затмения уменьшается. Во время маундеровского минимума (в реальности которого можно теперь не сомневаться) было отмечено также заметное отсутствие полярных сияний, которые, как мы теперь знаем, являются индикаторами сильных магнитных бурь на Солнце. Все говорит о том, что Солнце — не прогнозируемая переменная звезда, какой ее привыкли считать астрономы, а звезда, поведение которой подвергается значительным непредсказуемым изменениям. Согласно предположению Эдди, в настоящее время Солнце, возможно, приближается к большому максимуму в двадцать втором или двадцать третьем столетии.

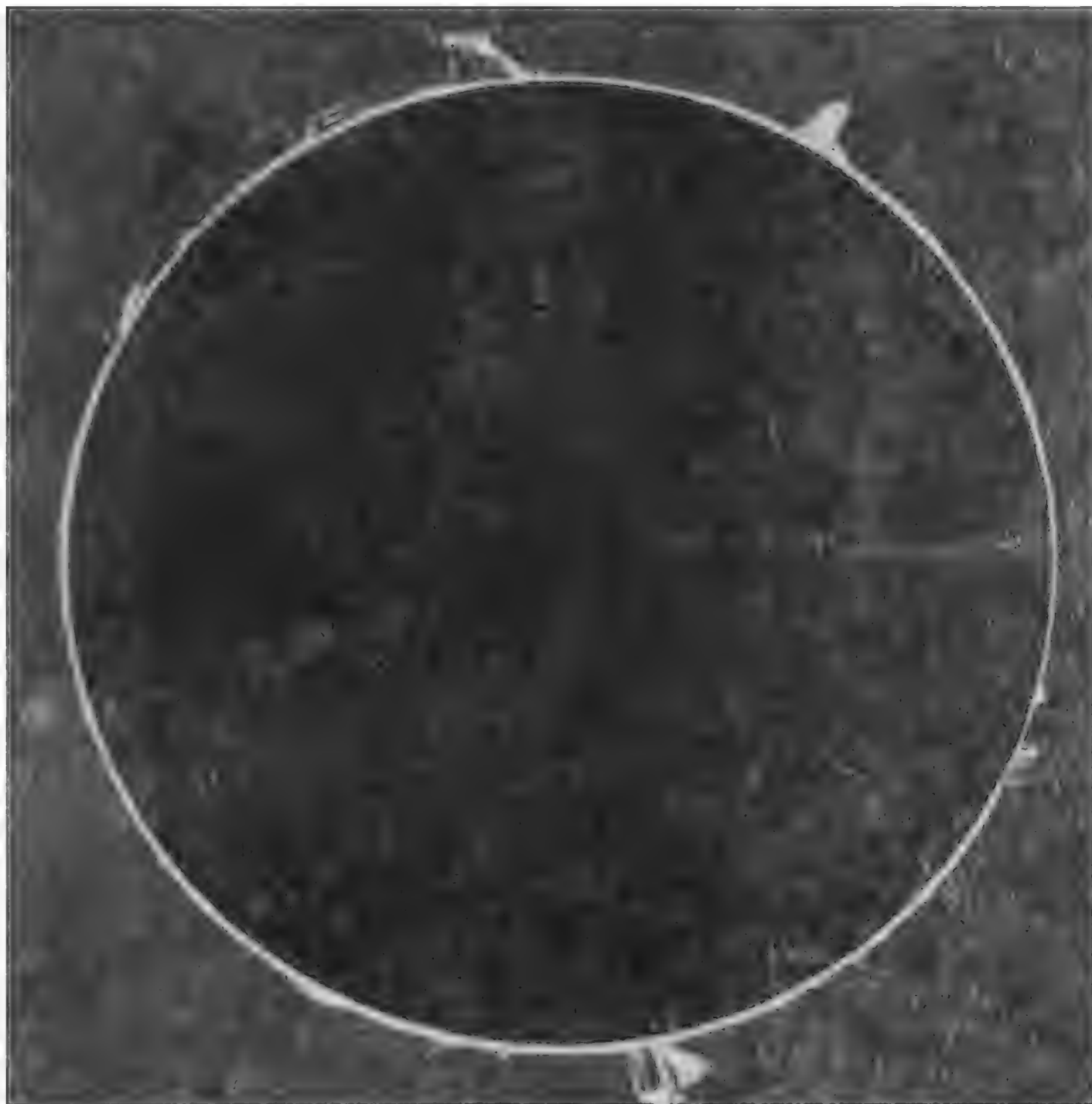
Исследование древних рукописей с упоминанием солнечных пятен, очевидно, сохранит свое значение и в будущем. В настоящее время мы не знаем, почему солнечный цикл

нерегулярен, хотя и знаем, что это действительно так; нет у нас и достаточно убедительных представлений о том, какое действие изменения активности могут оказывать на интенсивность излучения Солнца и, следовательно, какое действие они оказывают, если вообще оказывают, на погоду Земли.

Уже во время затмений было замечено, что размеры короны меняются с солнечным циклом. Корона, будучи относительно компактной и однородной в минимуме, в солнечном максимуме значительно больше и имеет сложную структуру. Когда на Солнце много пятен, корона характеризуется многочисленными длинными лучами, которые выглядят подобно лепесткам цветка. Корона также значительно ярче в максимуме. Во время маундеровского минимума наблюдатели описали корону как небольшое слабое свечение. Но лишь через несколько лет, в 1715 г. наблюдатель в Кембридже дал первое приемлемое описание короны и лучей (стримеров). В солнечном максимуме корона представляет собой поистине захватывающее зрелище. В минимуме истинная корона может даже полностью поблекнуть, остается лишь кольцо света, образующееся в результате рассеяния солнечного света пылью межпланетного пространства. От солнечного минимума к максимуму плотность частиц в короне возрастает вдвое, а температура — примерно на 20 %.

Во время затмения случайный зритель, а в эру телевидения и наблюдатель у экрана телевизора могут увидеть не только корону, но и протуберанцы. Существует несколько типов этих прекрасных образований, но лишь некоторые из них непосредственно связаны с активным Солнцем. Наблюдателям Солнца протуберанцы известны уже много столетий. В далеком 1239 г. во время затмения в короне была видна «горящая дыра»; по всей вероятности, это был гигантский протуберанец. Протуберанцы, по-видимому, упоминались и летописцами России в средние века. Во время затмения 2 мая 1733 г. Б. Вассениус в Гётенбурге в Швеции видел три или четыре протуберанца, о которых он говорит как о красном пламени; он считал эти явления облаками в атмосфере Луны. Любопытно, что все эти наблюдения были полностью забыты, так что астрономы были удивлены, когда во время затмения 8 июля 1842 г. некоторые из них заново открыли протуберанцы, которые они интерпретировали как горы на Солнце.

Значительный прогресс был достигнут к концу XIX столетия с изобретением фотографии и спектроскопии. Спектры, полученные во время затмения 1868 г., выявили в протуберанцах яркие эмиссионные линии. С тех пор протуберанцы правильно объясняют как светящиеся облака газа, лежащие



Протуберанцы, снятые на краю диска Солнца 9 декабря 1929 г. (Хейловская обсерватория, США)

высоко над поверхностью Солнца. Между прочим, именно во время этого затмения была открыта яркая спектральная линия, которую нельзя было связать с излучением какого-либо из известных тогда атомов, вследствие чего ее приписали новому солнечному элементу — гелию.

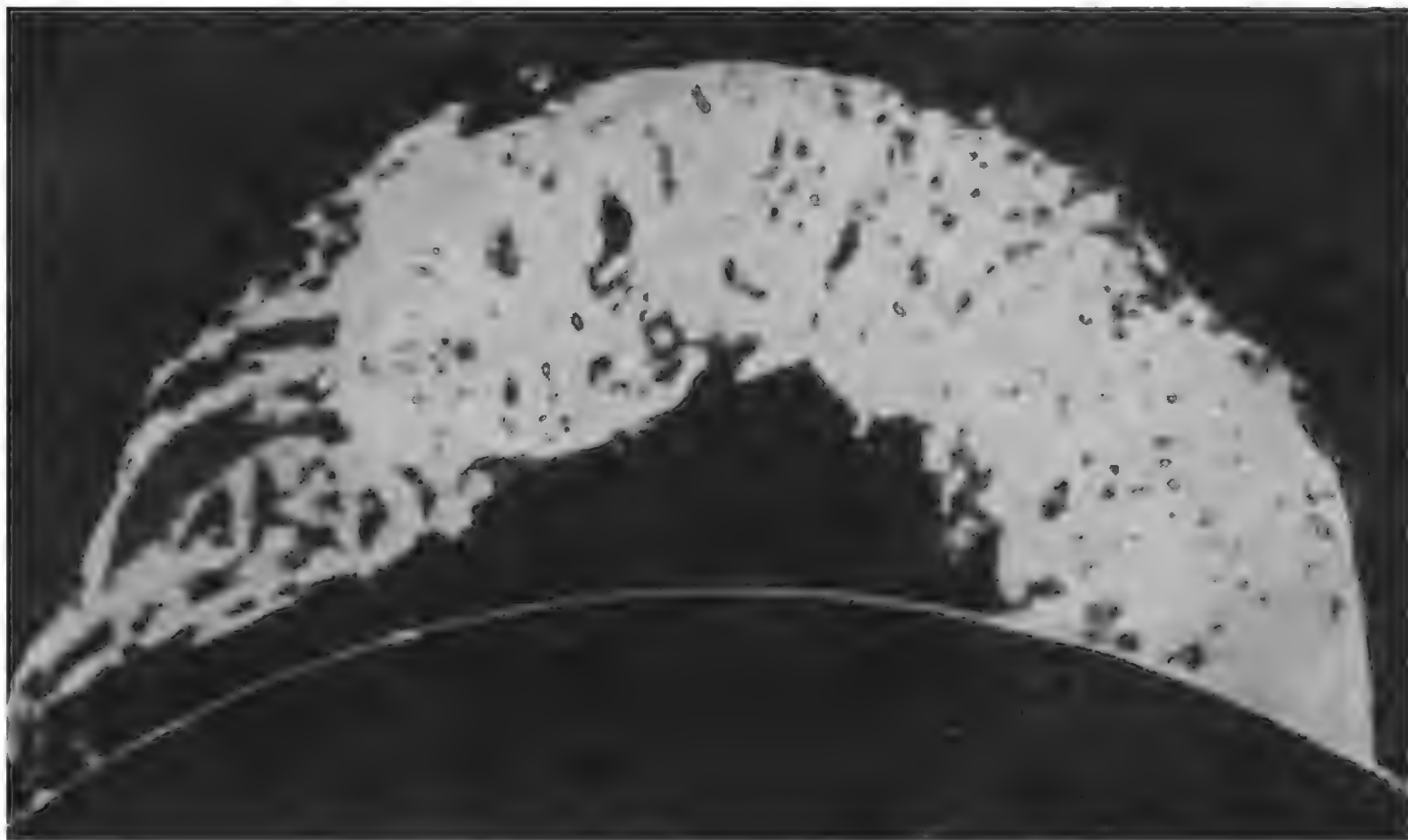
Что же такое все-таки протуберанец? Самым простым, хотя и не особенно научным, определением протуберанцев является следующее: протуберанцы — это структурные образования, которые напоминают пламя или штору, когда они наблюдаются на солнечном лимбе, как, например, во время солнечных затмений. Однако не все образования такого вида — протуберанцы, некоторые из них являются вспышками, о которых мы расскажем позднее. Несколько более научным будет утверждение о том, что протуберанцы — это холодные и плотные массы вещества в горячей короне. Они принимают множество различных форм, не меняющихся в течение интервала от нескольких месяцев до нескольких часов.

В прошлом гелиофизики предполагали, что протуберанцы представляют собой напоминающие фейерверк мощные выбросы вещества, исторгнутые из фотосферы. Однако современная фотосъемка, позволяющая проследить развитие протуберанца в ускоренном темпе, показывает, что во многих протуберанцах холодное вещество постоянно течет из короны в фотосферу.

Гелиофизики подразделяют все протуберанцы на два вида — *активные протуберанцы* и *спокойные протуберанцы*. Эта классификация существует с 1875 г. Названия активных протуберанцев — сёрдж (сплошной выброс), спрэй (выброс в виде струи из пульверизатора), петельный и эруптивный протуберанец — связываются с перемещающимися с высокой скоростью мощными крупномасштабными движениями вещества. Краткое рассмотрение некоторых из этих типов протуберанцев дает нам представление об их разнообразии.

Корональные облака висят в короне; вещество из них стекает в активные области нижележащей фотосферы. Обычно они существуют день или два и расположены на высотах в несколько десятков тысяч километров. Протуберанцы типа коронального облака по своим размерам, как правило, значительно больше Земли. Одновременно с корональными облаками могут наблюдаться явления типа коронального дождя, которые представляют собой излучающее вещество, стекающее вдоль искривленных силовых линий магнитного поля в фотосферу и ее активные области. Капли коронального дождя падают вниз со скоростями 50—100 км в секунду (100 000 миль в час). Не все протуберанцы выбрасываются высоко в корону; протуберанцы типа «холм», которые легче всего наблюдать вблизи солнечного лимба, являются низколежащими образованиями.

Существует несколько типов эффектных протуберанцев. В протуберанцах типа торнадо магнитное поле закручено в вертикальную спираль, вследствие чего протуберанец напоминает по своему виду смерч (торнадо). Петельные протуберанцы состоят из вещества, образующего в короне арки, которые своими концами упираются в солнечные пятна или вблизи них. Эти протуберанцы связаны с самыми сильными проявлениями солнечной активности. В вершине петли корона чрезвычайно горячая, и вещество низвергается вниз через оба основания петли. Иногда наблюдаются явления типа взрыва. Спрэй — это мощные выбросы горячего вещества со скоростями около 400 км в секунду (достигающими 1,5 млн. км в час), в которых начальное ускорение чрезвычайно велико — ускорение в несколько сотен g не является чем-то не-



Гигантский эруптивный протуберанец 4 июня 1946 г., — один из самых крупных из числа наблюдавшихся. Размеры протуберанца увеличились до размеров Солнца всего за час, еще через несколько часов он исчез (Обсерватория Хей Элтитюд и Национальный центр исследований атмосферы, США.)

обычным. Когда оно превышает минимальную скорость ухода вещества от Солнца, некоторая часть вещества, действительно, навсегда покидает Солнце. Наблюдения приводят к предположению о том, что некоторые из спреев происходят тогда, когда плазменный пузырь, плотно стянутый магнитным полем, неожиданно взрываясь, разносит свою клетку вдребезги. Иногда вещество выбрасывается вертикально вверх в виде протуберанца, известного под названием сёрдж. Примерно за пятнадцать минут он достигает высоты 100 млн. км в короне, а затем начинает падать обратно вдоль первоначальной траектории. Эти протуберанцы тоже, по-видимому, вызваны взрывом магнитного поля и горячего вещества в фотосфере, подобным взрыву бомбы. Запуск орбитальных космических лабораторий позволил гелиофизикам исследовать свойства протуберанцев и других явлений типа выброса на частотах невидимого, но обладающего большой энергией ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Ультрафиолетовый спектрогелиограф на «Скайлэбе» зарегистрировал эффектный солнечный выброс, взметнувшийся на половину радиуса Солнца (расстояние, в 50 раз большее диаметра Земли). Как выяснили, это была струя гелия с низкой температурой 50 000 К, выброшенная в горячую корону с температурой 2 млн. К. На рентгеновских изображениях заметно

также множество выбросов в корону в виде шипов — спайков.

Спокойные протуберанцы в целом более спокойные явления и не обязательно имеют какое-либо отношение к избытку энергии в активных областях. Они наблюдаются в ослабленных, старых магнитных областях и представляют собой длинное вертикальное полотнище излучающего вещества, мерцающее над солнечной поверхностью. Основания этих светящихся штор совпадает с границами супергрануляционных ячеек. В отличие от активных протуберанцев спокойные протуберанцы развиваются медленно и существуют несколько месяцев. На лучших фотоснимках видно, что структура спокойного протуберанца состоит в основном из серий тонких вертикальных прядей (*толщина* прядей, между прочим, составляет 200 км), по которым вещество медленно стекает со скоростью 3500 км в час, и это очень медленная скорость для плазмы в протуберанце! Каким-то образом в вершины этих протуберанцев поступает новое вещество, так как без подвода нового вещества они не смогли бы так долго существовать.

Одним из самых больших когда-либо наблюдавшихся протуберанцев и наиболее известным из всех был протуберанец 4 июня 1946 г. Он, несомненно, был непревзойденным по красоте. Гигантская арка, протянувшаяся на три четверти миллиона километров, пульсировала в хромосфере и короне, а затем внезапно начала подниматься вверх, пока не исчезла в короне.

Протуберанцы обычно фотографируют на лимбе Солнца, где они подобно языкам пламени выступают на фоне бархатно-черного неба. Но их можно видеть и на солнечном диске, где они выглядят как темные змееподобные образования, называемые волокнами. Конечно, они не совсем темные, но значительно менее яркие, чем сияющая фотосфера, и поэтому на фоне диска *кажутся* темными.

Спикулы, упоминавшиеся ранее в этой книге, можно во многих отношениях рассматривать как мини-выбросы или протуберанцы. Напоминая по форме конус и имея диаметр около 1000 км, они простираются в корону на расстояние, в десять раз превышающее их диаметр. Одновременно на Солнце насчитывается несколько тысяч спикул, каждая из которых до своего исчезновения существует в течение пяти или десяти минут.

Краткое ознакомление с протуберанцами может создать впечатление, будто протуберанцы представляют собой полыхающие над Солнцем горячие языки пламени. В действительности, как мы увидим далее, это не так. Протуберанцы на-



Небольшой протуберанец на лимбе имеет высоту 50 тыс. км. Хорошо видна его вертикальная структура, остающаяся неизменной несмотря на то, что вещество стекает вниз по «трубкам», образованным силовыми линиями магнитного поля. (Обсерватория Сакраменто-Пик, США.)

ходятся в нижней короне, где электронная плотность составляет примерно 10^8 электронов на 1 см^3 , а температура приблизительно равна 1 млн. К. С другой стороны, сами протуберанцы имеют электронные плотности по меньшей мере в 100 раз большие — от 10^{10} до 10^{12} электронов на 1 см^3 — и температуры около 10 000 К. Другими словами, протуберанцы значительно плотнее и много холоднее короны; их электронная температура порядка 10 000 К означает, что большая часть их энергии, несомненно, излучается в оптическом спектре. Другое дело — корона, гигантская температура которой приводит к тому, что вещество становится прозрачным для оптического излучения и превращается в мощный источник рентгеновского излучения.

Солнечные вспышки — другое значительное явление, связанное с активными областями; они, по-видимому, представляют собой наиболее сложные явления, наблюдаемые во внешней солнечной оболочке. Солнечная вспышка представляет собой совокупность ярких световых вспышек в солнечной атмосфере. Они продолжаются менее часа, иногда в течение лишь нескольких секунд, после чего гаснут. Хотя самые яркие вспышки могут быть видны и при наблюдении Солнца в белом свете, их легче обнаружить и проанализировать, если отфильтровать большую часть обычного солнечного света. Поэтому солнечные вспышки наблюдают, как правило, через узкополосные фильтры, которые пропускают лишь

спектральные линии водорода или кальция. На фотоснимках в линии водорода обычно заметно уярчение в нижней атмосфере (вероятно, во флоккулярной области), похожее на звездочку. Во время вспышки солнечная атмосфера (главным образом хромосфера) уярчается во всем электромагнитном спектре. Внезапное выделение накопленной в магнитном поле энергии приводит к временному локальному нагреву плазмы. Разряд электромагнитной энергии в области вспышки приводит к тому, что электроны, протоны и другие заряженные частицы получают мощный ускоряющий импульс. Почти мгновенно электроны устремляются во все стороны со скоростью, близкой к скорости света, и, взаимодействуя как с другими заряженными частицами, так и с магнитным полем, начинают излучать энергию во всем диапазоне электромагнитного спектра — от сверхдлинных радиоволн до высокоэнергичного рентгеновского излучения. Самые впечатляющие вспышки неистовствуют обычно в тех областях, где пятна особенно велики.

Вспышки — наиболее значительные из проявлений солнечной активности, влияющих на Землю. Заряженные частицы, выбрасываемые во время вспышек, вторгаются в верхнюю атмосферу нашей планеты. Именно вспышки возмущают ионосферу, прерывая радиосвязь и вызывая полярные сияния.

Во время вспышек сильно возрастает ультрафиолетовое и рентгеновское излучение от Солнца, так как вспышки являются высокотемпературными высокоэнергичными явлениями. В наших знаниях о вспышках был достигнут значительный прогресс благодаря наблюдениям со «Скайлэба». Решающим фактором этих исследований была непрерывность последовательности изображений, полученных во время полета «Скайлэба». Астрономы смогли проследить развитие вспышек с самого момента их появления и обнаружили, что они начинаются в вершинах плотных арок магнитного поля, вытянутых от Солнца в виде петель. Измерения подтвердили, что энергия, выделяемая на коротких длинах волн, действительно много больше энергии, выделяемой в оптическом диапазоне.

В ультрафиолетовом спектре вспыхивающих областей наблюдается до 5000 различных эмиссионных линий. В период пребывания первого экипажа на «Скайлэбе» ученые сфотографировали вспышку в свете паров железа при температуре 17 миллионов градусов. Возможно, что температура вспышки достигала 20 миллионов градусов, что горячее, чем в ядре солнечного реактора. Этот высокий уровень возбуждения переводит атомы хромосферы в более высокое энергетическое

состояние и определяет спектр, богатый эмиссионными линиями.

В течение солнечного цикла, определяемого количеством пятен на диске, число вспышек соответственно растет или уменьшается. Вспышка начинается, по-видимому, тогда, когда в магнитном поле активной области накапливается избыточная энергия. Это происходит вследствие того, что магнитное поле над группой из двух солнечных пятен закручивается кверху или оказывается плотно сжатым. На некоторой стадии этого процесса возникающее напряжение стремится разрядиться, и это действительно происходит в тот момент, когда силовые линии магнитного поля быстро перезамыкаются и сливаются друг с другом. Выделяемая при пересоединении линий энергия, вероятно, и вызывает те чудовищные ускорения, которые наблюдаются, когда плазма устремляется в корону. Согласно данным, полученным при наблюдениях с помощью телескопа из космоса, сам процесс вспышки, по-видимому, происходит в верхней части петельной структуры над парами солнечных пятен.

Чрезвычайно быстрое выделение энергии во вспышке является загадкой для теоретиков. Каким-то образом магнитное поле постоянно накапливает энергию, и вопреки всем типам малых возмущений, которые должны существовать там вследствие неистовых метаний вещества в активной области, оно способно помешать серьезной утечке избыточной энергии. Затем энергия, столь экономно накопленная, разом высвобождается в виде единого мощного потока, в котором выделяется до 10^{25} джоулей; эта энергия равна энергии, испускаемой всем Солнцем за одну двадцатую долю секунды, или полному количеству солнечной энергии, получаемой планетой Земля в течение целого года! Выброс массы во время такого события достигает 10 млрд. т, и вся эта масса уносится от Солнца со скоростью 1000 км в секунду, причем отдельные частицы достигают скорости, равной половине скорости света.

Исследования вспышек на обсерваториях, проводящих оптические наблюдения, дополняются наблюдениями со спутников и ракет. При распространении вспышечного процесса через хромосферу и корону генерируется поток жесткого рентгеновского излучения, интенсивность которого менее чем за минуту достигает своего максимального значения. Излучение возникает, когда предварительно очень сильно ускоренные электроны резко тормозятся при столкновении с веществом вне самой вспышки. Большая часть генерируемого таким образом рентгеновского излучения возникает в плотной нижней хромосфере. Когда поток энергии достигает хромосферы,

там происходит взрывообразный процесс нагрева вещества. Картина по своему виду напоминает взрыв газового пузыря, по которому полоснули лучом импульсного лазера. С гигантской скоростью, большей скорости ухода вещества от Солнца, расширяющаяся взрывная волна вырывается наружу, унося с собой в межпланетное пространство 10 млрд. т вещества дневной звезды.

На Солнце нет простых процессов, не прост и взрыв в атмосфере. Взрывная волна захватывает и уносит с собой часть магнитного поля, и движущиеся силовые линии этого поля могут действовать подобно гигантским ускорителям частиц. Ядерные частицы ускоряются до очень высоких энергий, хотя, если быть честным, ни один теоретик в действительности не понимает, как это происходит. Одним из следствий этого ускорения является образование дейтерия в результате достаточно жестких столкновений протонов и нейтронов; как я уже упоминал, гамма-лучи, испускаемые образующимися в атмосфере частицами дейтерия, были обнаружены.

Другой импульс гамма-излучения, регистрируемый от Солнца, обязан своим происхождением взаимной аннигиляции электронно-позитронных пар. Позитрон — это античастица электрона, и когда частица и античастица сталкиваются, что, по-видимому, и происходит в солнечных вспышках, они исчезают, рождая два фотона гамма-излучения одной и той же энергии — энергии, единственным образом характеризующей аннигиляцию данной электронно-позитронной пары. Наблюдаются и другие линии гамма-излучения, возникающие, вероятно, в результате столкновений между заряженными ядерными частицами и нейтронами.

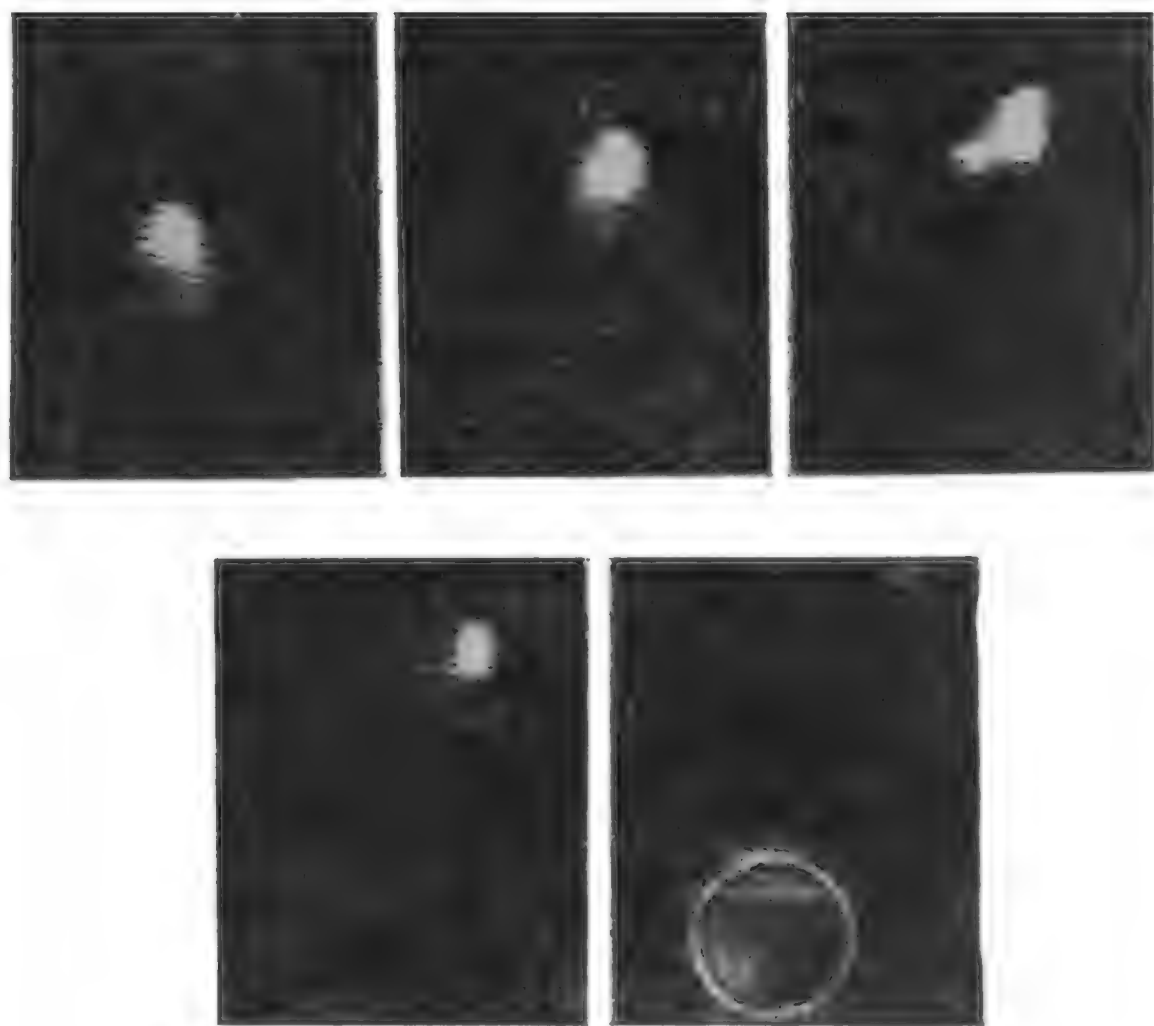
Кроме очень энергичного рентгеновского и гамма-излучения регистрируется также и более мягкое рентгеновское излучение с тепловым спектром. Оно, как полагают, возникает в окружающей вспышку корональной плазме, которая во время вспышечного процесса была нагрета примерно до 10 млн. К. Подобный же механизм приводит к ультрафиолетовому излучению, которое, согласно наблюдениям, исходит из хромосферы.

Во время вспышки не сидят без дела и солнечные радиоастрономы. Значительная доля шумового радиоизлучения возбуждается заряженными частицами, захваченными движущимися магнитными полями. Большие солнечные вспышки часто сопровождаются всплесками шумового радиоизлучения на метровых длинах волн, которые включают в себя и всплески, известные под названием всплесков II типа. (Различные типы шумового радиоизлучения были классифицированы радиоастрономами как всплески I, II

и т. д. типа, но лишь всплески II типа и III типа, по-видимому, непосредственно связаны со вспышками.) Через некоторое время после начала вспышки излучение становится заметным и на более низких частотах. Для его регистрации были сконструированы специальные приемники радиоизлучения. Эти радиовсплески начинаются примерно через десять минут после начала вспышки в оптическом диапазоне и продолжаются в течение примерно того же самого интервала времени. Они возбуждаются потоками ускоренных во вспышке частиц. Пучок частиц, пронизывая внешнюю солнечную атмосферу, при своем движении от Солнца способен возбуждать излучение на все более низких частотах. И действительно, с космического аппарата были зарегистрированы всплески на частотах с нижней границей до 300 кГц, которые приходили с расстояния, более чем на тридцать солнечных радиусов отстоящего от солнечного лимба.

Развитие радиовсплесков во времени в виде последовательности прекрасных радиоизображений Солнца было проиллюстрировано австралийскими учеными под руководством Поля Вилда на Калгарской обсерватории в Новом Южном Уэльсе. Это высокоточный австралийский инструмент — интерферометр, состоящий из 96 элементов. Его назначение — дважды в секунду строить радиоизображение окрестностей Солнца. Изображение Солнца в радиодиапазоне представляет собой мозаику из кружков, диаметр каждого из которых приблизительно равен двум минутам дуги, что соответствует на Солнце примерно 100 000 км. Радиотелескоп не только регистрирует всплески II типа при их распространении от Солнца в космическое пространство, но и может строить радиоизображение гигантских протуберанцев.

Как видно из этой главы, Солнце — это слабопеременная магнитная звезда. Мы видим детали его магнитного поля с таким разрешением, которое немыслимо для других звезд. В то же время, если сравнить это магнитное поле с полями действительно магнитных звезд — белых карликов и нейтронных звезд, — оно весьма незначительно. Тем не менее это относительно слабое магнитное поле оказывает заметное воздействие на динамику поведения солнечной атмосферы и служит причиной целого ряда энергичных явлений: протуберанцев, шумовых бурь и вспышек. Находящееся под фотосферой магнитное поле контролирует рождение пар солнечных пятен. И пока продолжается дифференциальное вращение — машина, эффективно наматывающая силовые линии, — Солнце претерпевает свой уже знакомый цикл изменений. Но всегда ли так было? Существуют очень убедительные сви-



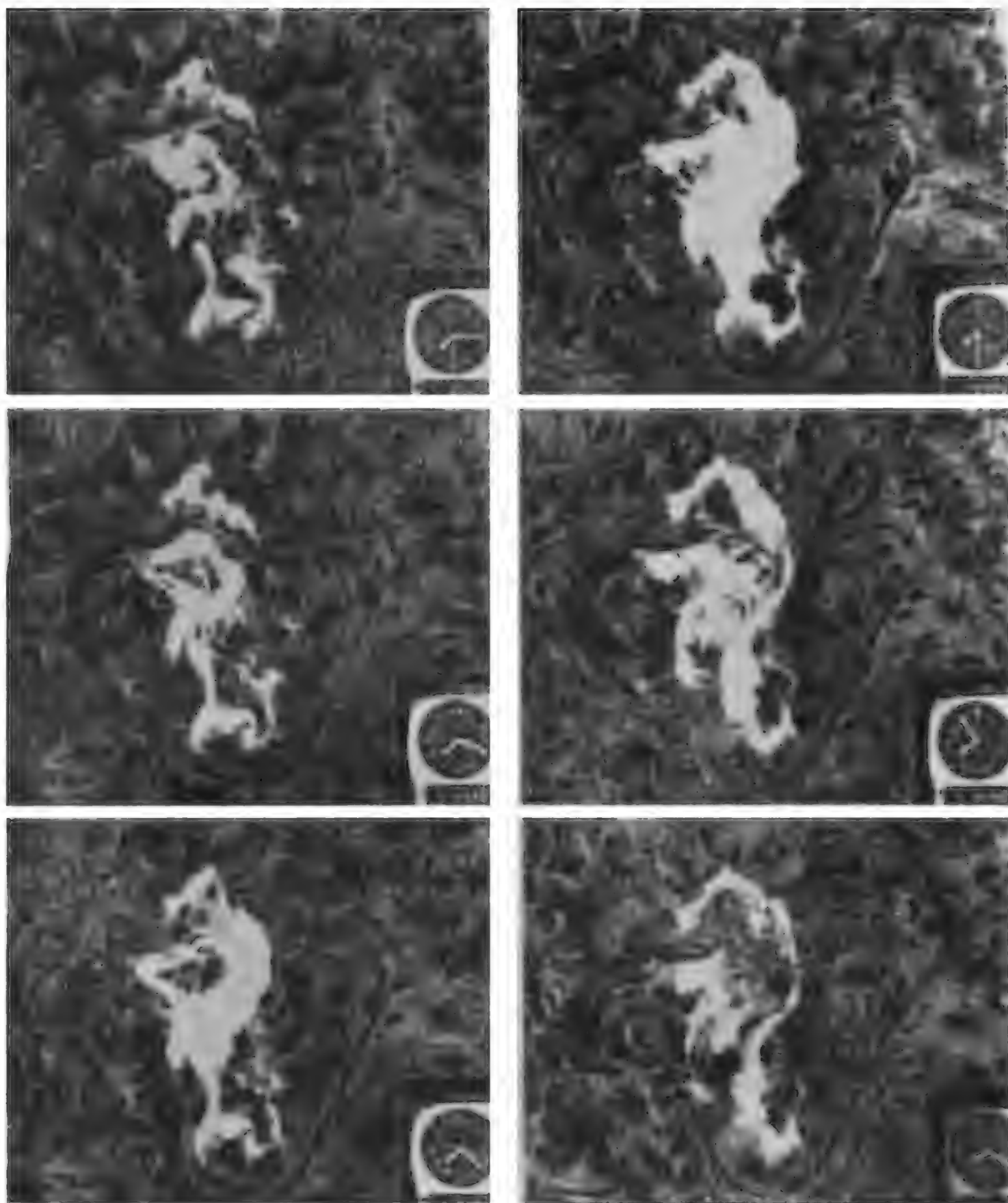
Пять изображений, полученных с помощью радиогелиографа в Калгуре (Австралия). Они показывают выброс облака радиоизлучающей плазмы, положение Солнца отмечено кругом. (Отделение радиофизики CSIRO, Австралия.)

детельства, указывающие на то, что Солнце флуктуирует с периодами порядка столетий.

Хотя о магнитном поле Солнца мы знаем больше, чем о поле любой другой звезды, мы все еще слишком далеки от понимания механизма и природы этого магнетизма. И хотя я нарисовал качественную картину (или лучше сказать — дал некоторое представление) того, каким образом, возможно, возникают и развиваются солнечные пятна и вспышки, большинство исследователей правдиво скажут, что ни одно из этих явлений пока еще как следует не понято. У нас, безусловно, нет законченной теории первоначальной генерации магнитного поля или механизма периодической смены его знака. Многие вопросы все еще остаются без ответа. Каким образом вспышки накапливают магнитную энергию, до того как бомба взорвется? И что является запалом для бомбы? Это проблемы переднего края исследований, и поэтому в течение следующих нескольких лет их детальное рассмотрение будет продолжаться.

В заслугу исследованиям активного Солнца можно поставить то, что эти исследования привели к огромным достижениям в астрономии, астрофизике и физике плазмы.

На заре своей истории радиоастрономия была обязана



Гигантская солнечная вспышка 7 августа 1972 г., снятая в свете красной линии водорода; показана серия из шести изображений, полученных в течение 1 час. (Солнечная обсерватория Биг Бэр, США.)

своим развитием не только своим научным достижениям, но и тому, что могла претендовать на большую долю научных бюджетов, обусловленным, в частности, многообразием проявлений и форм солнечного радиоизлучения — темы, которой мы лишь коснулись здесь. Открытия в солнечной атмосфере, которую можно рассматривать как дешевую доступную естественную лабораторию, оказали очень сильное влияние на физику плазмы, — науку, исследующую, как движется и ведет

себя горячая плазма при наличии магнитного поля. В истории человечества вторичное открытие солнечных пятен в XVII веке привело к существенному изменению сознания людей (наблюдая природу, доверяйте доводам своего разума, а догма пусть позаботится о себе сама), которое и заложило основу для совершенно нового научного века. Мы не должны забывать и о вызывающих трепет радиогалактиках и квазарах, неисчерпаемых источниках космической энергии в бесконечных далях Вселенной. Возможно, лишь немного из того, что мы пытались узнать так близко от дома, может быть применимо к этим экзотическим объектам. Характерные для солнечной вспышки механизмы ускорения электронов, удержание магнитными полями, перераспределение энергии большого числа отдельных частиц в огромную энергию малого числа частиц — все эти и многие другие явления могут, вероятно, найти приложение в радиогалактиках, остатках сверхновых и рентгеновских звездах.

Одним из самых глубоких и острых вопросов, который мы можем поставить, является вопрос: как в действительности возникает солнечное магнитное поле? Солнце состоит из вещества с высокой электрической проводимостью, поэтому магнитное поле «вмораживается» в движущуюся плазму. Тот факт, что перемешанное вещество увлекает за собой магнитное поле, делает проблему исследования солнечного магнитного поля трудной для астрономии задач. Разнообразные движения в плазме индуцируют электрическое и магнитное поля, создавая тем самым условия, способствующие установлению динамо внутри Солнца. В начале XX столетия Дж. Лармор предложил элементарную теорию солнечного магнитного поля, поддерживаемого за счет действия динамо. У. М. Эльзассер в 1940-х годах возродил эту теорию; далее в течение двух последующих десятилетий она была развита Е. Н. Паркером. По существу, теория предполагает, что магнитное поле уже существует, и стремится объяснить, как это поле может поддерживаться при условии, что вещество на Солнце является хорошим проводником электричества. Предположение о том, что на Солнце существует некоторое начальное магнитное поле, в действительности не содержит никаких серьезных трудностей. Магнитное поле существует в Галактике повсюду, поэтому при своем сжатии солнечная туманность совершенно спокойно могла захватить часть этого общемирового поля, сжимая и усиливая его по мере образования протосолнца.

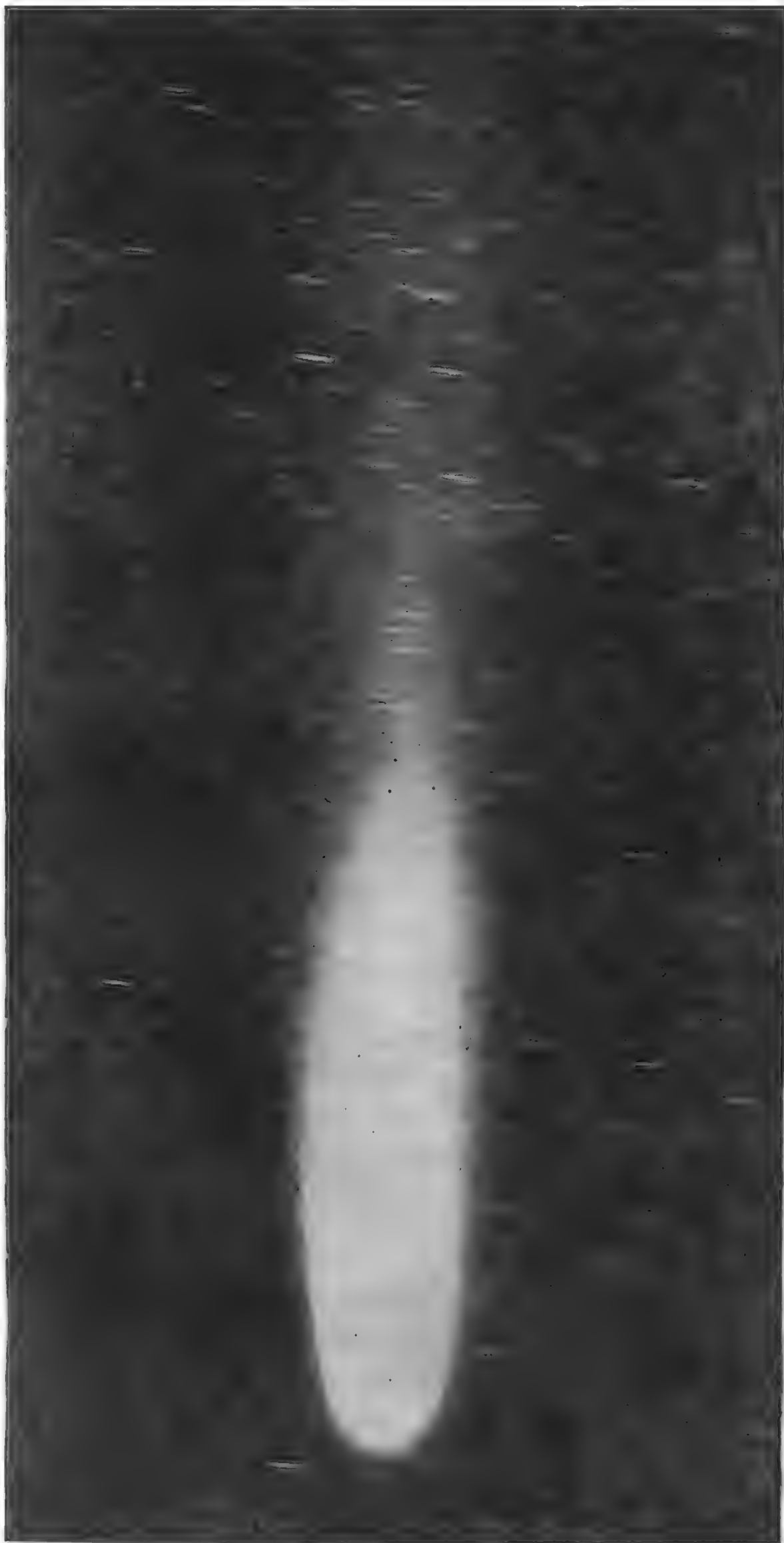
Задача теории динамо заключается в том, чтобы показать, каким образом проводящая плазма, движущаяся в магнитном поле, может генерировать электрические токи, которые

поддерживают магнитное поле вопреки его естественной тенденции к диссипации. Это — самовозбуждающееся или самоподдерживающееся динамо. Возможность его существования была установлена Е. К. Баллардом в 1949 г. Первые попытки Паркера решить эту проблему показали, что некоторые виды магнитного поля могут усиливаться за счет наматывающих движений солнечного дифференциального вращения. Более поздние работы, связывающие поле солнечных пятен, дифференциальное вращение и полный цикл солнечных пятен со слабым общим полем, укрепили уверенность астрономов в теории динамо. Тем не менее у нее пока еще нет прочной основы, и такой основы не будет до тех пор, пока расчеты и вычисления не оставят каких-либо сомнений относительно механизма действия динамо.

В космос

При синтезе водорода в своем центральном реакторе Солнце каждую секунду теряет около 4 миллионов тонн своей массы. Но этот акт превращения вещества в излучение — не единственный источник потерь массы Солнцем; с ним вполне может поспорить поток частиц, уносящихся от Солнца в виде солнечного ветра. На своих внешних границах корона очень горяча и лишь слабо удерживается гравитацией; к тому же при удалении от Солнца температура меняется медленно. Это приводит к ситуации, при которой горячая внешняя корона по существу постоянно расширяется в космический вакуум; это истечение вещества из короны и называется солнечным ветром.

Представление о том, что Солнце, возможно, выбрасывает частицы в космическое пространство, относится по меньшей мере к 1930-м годам, когда двое ученых, С. Чэпмен и В. Ферраро, предложили модель столкновения облаков солнечной плазмы с Землей для объяснения внезапных изменений магнитного поля на поверхности Земли. Новым ключом к разгадке послужило тщательное исследование в 1950-х годах хвостов комет. Астрономы, конечно, давно знали о том, что при движении кометы вокруг Солнца ее пышный хвост всегда направлен прочь от Солнца. Существовала теория, согласно которой под действием отклоняющего давления солнечного излучения хвосты комет вытягивались из головы кометы в направлении от Солнца. Однако наблюдатели комет начали замечать, что иногда в газе кометных хвостов наблюдаются внезапные необъяснимые скачки, как будто с хвостом что-то сталкивается. В 1951—1953 гг. немецкий астроном Л. Бирман предположил, что эти изменения могут быть вызваны непрерывно истекающими из Солнца частицами. Сегодня мы знаем, что модель Бирмана о взаимодействии частиц с хвостом неверна, но основная идея о солнечном ветре, истекающем радиально из Солнца, принадлежит ему. И наконец, в 1958 году Е. Н. Паркер рассчитал, что горячая корона просто не может оставаться вокруг Солнца в виде неподвижной оболочки; таким образом, невозможно избежать ее расширения в космическое пространство в виде ветра.



Комета Беннета 1970 г. Хвост кометы всегда направлен от Солнца, независимо от направления движения самой кометы, поскольку солнечный ветер и давление излучения отбрасывают кометное вещество прочь от Солнца. (Таутенбергская обсерватория, ГДР.)

Прямые измерения, подтверждающие существование ветра, стали возможны лишь в космический век. Советские межпланетные космические зонды, запущенные в 1959—1961 годах, обнаружили в космическом пространстве потоки заряженных частиц; американские ученые в 1961 году подтвердили этот общий результат на спутнике «Эксплорер-10». В 1962 году успешный полет ракеты «Маринер-2» к Венере снял все какие-либо остававшиеся сомнения. В течение трех месяцев этот корабль упорно прокладывал свой путь сквозь солнечный ветер, регистрируя средние скорости более 500 км в секунду — 1,5 млн. км в час.

1960-е и 1970-е годы были замечательным периодом для исследований солнечного ветра, так как резкий рост количества полученных данных привел к тому, что астрономы оказались в положении, когда они знали об этом ветре больше, чем о каком-либо другом виде плазмы во Вселенной. Но, как мы увидим позднее, солнечный ветер изучался и с помощью телескопов на Земле.

На различных стадиях истории астрономии изучение Солнца давало важную информацию астрофизикам, не занимающимся специально Солнцем; это одна из причин, продолжающих стимулировать детальные наблюдения Солнца. В 1964 г. произошло обратное: необходимость исследовать некоторые внегалактические радиоисточники с помощью новых методов по существу позволила оценить по достоинству тот факт, что солнечный ветер может быть полезен при попытках исследования очень далеких галактик. В начале 1960-х годов большинство усилий в области радиоастрономии было связано с радиогалактиками. Эти необычно возмущенные галактики являются мощными источниками радиоизлучения; они продолжают интересовать астрономов даже теперь, хотя, возможно, и не в такой степени, как раньше. Угловые диаметры некоторых из радиоисточников вне нашей Галактики, по-видимому, очень малы. Часть этих радиоисточников лежит вблизи эклиптики, — кажущегося пути Солнца относительно неподвижных звезд при наблюдении с Земли. Радиоисточники, лежащие на линии зрения, проходящей вблизи Солнца, действительно ведут себя очень странно. Наблюдения источников обнаруживают эффект, называемый сцинтилляцией. При этом в общих чертах происходит следующее: радиоволны, проходя сквозь облака плазмы вблизи Солнца, искажаются таким же образом, как и объекты, которые рассматривают над горячей поверхностью (скажем, нагретой плитой). При наблюдении сквозь поднимающиеся струи горячего воздуха кажется, что они мерцают и дрожат.

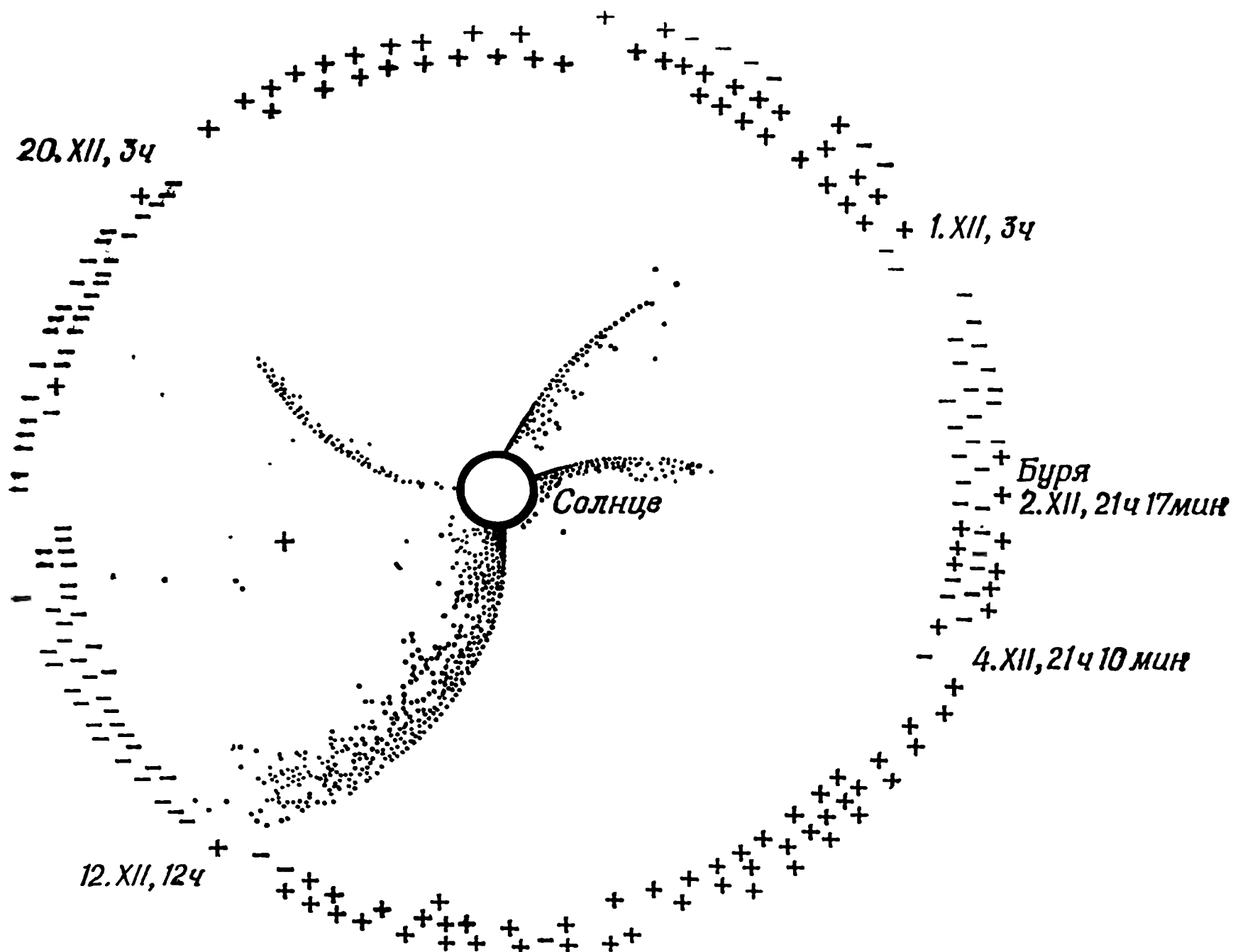
Дальнейшие исследования с помощью радиометодов выявили некоторые интересные свойства солнечного ветра. Эти исследования дополнили непосредственное изучение солнечного ветра со спутников типа ИМП. Солнечный ветер очень помог астрономам и в другом: телескоп, построенный в Кембридже для изучения вызываемых солнечным ветром сцинтилляций радиогалактик и квазаров, привел к открытию пульсаров, обнаруженных впервые в 1967 г.

Динамические свойства солнечного ветра тесно связаны с короной и ее магнитным полем. Это определяется тем, что солнечный ветер обладает очень высокой электрической проводимостью, вследствие чего поток ветра поперек силовых линий магнитного поля становится затруднен или даже невозможен.

Значительная часть солнечного магнитного поля, вытягиваясь, увлекается уносящимся от Солнца ветром. Скорость расширения, очень сильно зависящая от солнечной активности, а следовательно, и от количества тепловой энергии, поступающей в корону, испытывает большие вариации. Согласно измерениям с Земли, скорость истечения может возрасти от низких значений около 400 км/с до вдвое большей величины за пару дней. Скорость этих потоков обычно уменьшается до прежних низких значений более медленно. При этом максимальный поток сохраняется в течение нескольких дней. Как и принято в астрономии, скорости обозначают через расстояние в секунду; не забывайте, что 400 км в секунду — это свыше 1,25 миллиона км в час — настоящий шторм! Когда от Солнца устремляется новый поток, он регистрируется космическим аппаратом по внезапному возрастанию магнитного поля и плотности частиц вне корабля. Через несколько дней оба эти значения — и магнитного поля и плотности частиц — спадают до необычайно низкой величины. Вся картина напоминает волновой процесс с образованием гребней и впадин.

Как мы уже видели в предыдущей главе, когда на Солнце происходит большая вспышка, избыточное вещество выбрасывается из короны с высокой скоростью. Вследствие быстрого движения вещества от Солнца оно прокладывает себе путь в среде, движущейся более медленно с типичными скоростями солнечного ветра. В результате этого возникает «пробка», называемая ударной волной, толщиной в несколько миллионов километров. Другим источником избыточного вещества, пополняющим общий поток ветра, являются эруптивные протуберанцы.

Тот факт, что солнечный ветер увлекает за собой магнитное поле, имеет интересные следствия. В качестве одного из



Межпланетное магнитное поле разделено на секторы с противоположной магнитной полярностью.

таких следствий можно указать на межпланетное магнитное поле, которое поддерживается за счет ветра. В пределах примерно трех солнечных радиусов от солнечной поверхности магнитное поле достаточно сильно, и его энергия преобладает над энергией ветра; другими словами, поток ветра определяется локальным магнитным полем. Однако за пределами этого критического расстояния ведущую роль играет ветер. В результате поле искажается и уносится ветром к границам солнечной системы. До расстояния, равного критическому, корона должна вращаться вместе с Солнцем как целое, но за его пределами она начинает отставать. Это происходит из-за того, что магнитное поле за пределами критического расстояния недостаточно сильно для того, чтобы заставить внешнюю корону жестко вращаться вместе с Солнцем. В результате линии коронального магнитного поля приобретают спиральную форму, напоминающую водяные струи, образующиеся когда ваш садовый шланг вывертывается из рук и начинает бешено крутиться; тот же самый эффект со-

здается, хотя и не столь драматично, некоторыми типами вращающейся садовой поливальной вертушки.

Одним из интересных свойств ветра и магнитного поля является то, что поток не строго радиален (т. е. не похож на спицы велосипедного колеса). Если смотреть со стороны одного из полюсов Солнца, он закручивается под очень малым углом. Это означает, что ветер уносит с собой от Солнца угловой момент. Солнечный ветер действует подобно тормозу, который неумолимо замедляет вращение нашей дневной звезды. Это один из наиболее интересных вопросов, потому что одна из загадок Солнца как раз и заключается в том, почему оно вращается так медленно. В конце концов Солнце образовалось в результате сжатия части межзвездного облака; последнее до своего сжатия, возможно, и перемещалось в Галактике с небольшой скоростью, после конденсации в прото-Солнце должно было начать вращаться быстро. В некотором смысле Солнце избавилось от большей части той энергии вращения, которой оно когда-то обладало. Один из возможных способов — это потеря энергии за счет «эффекта рогатки», при котором Солнце выбрасывало солнечный ветер вдоль своих магнитных щупалец.

Простой расчет показывает, что тормоз — солнечный ветер — полностью замедлит Солнце примерно за 5 млрд. лет. Это современный возраст Солнца! Таким образом, сегодняшняя скорость вращения значительно меньше той, которая была при рождении Солнца. Возможно также, что магнитные связи между прото-Солнцем и протопланетами привели к такому строению солнечной системы, при котором почти весь полный угловой момент всей системы (98 %) оказался сосредоточенным в планетах, а не в звезде-прародительнице. Это может объяснить, почему энергия вращения Солнца меньше энергии вращения многих других звезд; Солнце передало планетам бóльшую часть своей энергии вращения на очень ранней стадии своей жизни. Действительная картина событий в солнечной туманности теперь потеряна в дымке времени; мы можем лишь сказать, что ветер продолжает действовать как слабый тормоз.

Из чего состоит солнечный ветер? Полеты «Аполлонов» к Луне позволили ученым-солнечникам изучить его химический состав. Во время посещения экипажами «Аполлона-11» и «Аполлона-12» Луны ими были развернуты куски алюминиевой фольги таким образом, чтобы они подобно парусу были обращены к Солнцу. В течение всего времени пребывания на Луне каждый лист фольги подвергался постоянной бомбардировке частицами солнечного ветра. Перед тем как отправиться домой, астронавты свернули эти куски фольги

и привезли их с собой на Землю. Лабораторный анализ этих кусков фольги позволил точно оценить число и состав атомов, содержащихся в солнечном ветре. Это замечательное достижение, так как оно дает прямое определение состава солнечного вещества. Ученые показали, что отношение числа атомов гелия к числу атомов водорода равно примерно $1/20$. В единицах массы это означает: 15 % массы солнечного ветра составляет гелий, почти вся остальная масса — водород.

Сопоставим это значение с относительным содержанием гелия внутри Солнца согласно теоретическим расчетам. Относительное обилие гелия в космическом пространстве обычно принимается равным примерно одному атому гелия на каждые десять атомов других элементов; соответствующее соотношение для масс составляет 25—30 % гелия от общей массы, что примерно в два раза больше содержания гелия в солнечном ветре. По-видимому, во внешней короне и солнечном ветре гелий менее распространен. В противном случае мы могли бы прийти к выводу, что измерения не верны. По всей вероятности, Солнце способно лучше удерживать свой атмосферный гелий, чем водород, вследствие чего у нас складывается ошибочное представление о дефиците гелия в короне. Другие составляющие, отождествленные в солнечном ветре, — это кислород, углерод, неон, кремний и железо. Они были обнаружены спутником «Вела» в конце 1960-х годов.

В общем потоке солнечного ветра существуют вариации, особенно в те периоды, когда наблюдаются высокоскоростные потоки. Они были зарегистрированы впервые в 1962 году американским космическим аппаратом «Маринер-2». Когда этот космический зонд встретился с потоком, средняя скорость потока удвоилась с 300 км в секунду до почти 600 км в секунду примерно за два дня; затем она уменьшалась в течение пятидневного периода. Наблюдения, проведенные последующими космическими аппаратами, установили, что эти устойчивые каналы для частиц, стремящихся покинуть Солнце, вращаются вместе с Солнцем. Это согласуется с важным результатом, полученным в 1963 году с межпланетного космического аппарата ИМП-1. Измерения направления межпланетного магнитного поля совершенно отчетливо продемонстрировали, что поле разбито на сектора, вращающиеся вместе с Солнцем. Внутри больших секторов магнитное поле имеет вполне определенную полярность, которая сохраняется и во время последующих солнечных оборотов. Секторная структура предполагает, что солнечный ветер в свою очередь должен возникать в тех секторах короны, магнитные поля которых организованы подобным образом. Одним из важных результатов, полученных со спутника ИМП-1, было обнару-

жение того факта, что магнитные поля в межпланетном пространстве образуют картину, позволяющую сопоставлять их с магнитными полями в фотосфере. После учета времени запаздывания, в течение которого солнечный ветер переносил поле от Солнца к ИМП-1, ученые достигли прекрасного соответствия между полем на диске и межпланетным полем. Это подтвердило ту точку зрения, что солнечное магнитное поле, солнечный ветер и межпланетное магнитное поле взаимосвязаны между собой. Высокоскоростная часть солнечного ветра имеет вид трубок, образующих в солнечной системе раскручивающуюся спираль. Со стороны Солнца трубки, по-видимому, прикреплены к тем точкам на Солнце, в которых магнитное поле радиально уходит в межпланетное пространство. Однако эти точки, по-видимому, не связаны тесно с солнечными активными областями. Интуитивно мы могли бы ожидать, что солнечные пятна и активные области являются теми соплами реактивных двигателей, из которых дует солнечный ветер. Однако это не так: никакой отчетливой связи между обычными проявлениями солнечного ветра и изменениями числа активных областей не существует.

«Скайлэб» установил, что полярные области Солнца являются важным источником высокоскоростных потоков, наблюдающихся в солнечном ветре. Наблюдения, проведенные во время экспедиций на «Скайлэбе» и непосредственно после них, подтвердили, что высокоскоростной ветер течет из полярных шапок. В этих двух областях силовые линии магнитного поля разомкнуты, вследствие чего плазма может свободно истекать в межпланетное пространство. Магнитное поле вблизи Солнца имеет такую форму, что некоторые из высокоскоростных потоков отклоняются к основной плоскости солнечной системы, которая находится именно там, где проводятся измерения с космических аппаратов.

Солнечные вспышки оказывают вполне определенное воздействие на солнечный ветер, вызывая в нем возмущения, распространяющиеся сквозь нашу планетную систему. Представьте, что происходит: магнитное перезамыкание, с которого начинается вспышка, приводит к выделению в корону огромного количества энергии. «Осколки» вспышки — высокоскоростные электроны и протоны — вторгаются в обычный солнечный ветер и межпланетное поле, создавая ударную волну в том месте, где они сжимают плазму солнечного ветра. Космический аппарат, подобный тем, что составляют серию спутников «Вела», может проводить наблюдения таких ударных волн, так как многие из инструментов на его борту регистрируют резкие изменения скорости, плотности и температуры частиц в момент прохождения возмущения мимо корабля.

Кроме ветра, состоящего из атомных частиц, межпланетное пространство содержит также твердые частицы пыли и газообразное вещество, которые в целом и образуют солнечный ветер. Этой пыли обязано своим происхождением прекрасное явление, которое связано с Солнцем и лучше всего наблюдается в безлунные ночи в прозрачных небесах тропиков. Впервые действительно прозрачное небо я увидел вдалеке от городских огней в Новом Южном Уэльсе, в нескольких сотнях километров к югу от тропика Козерога. Меня поразили светящийся характер неба, столь отличный от неба Англии; в то время как я стоял под темным куполом Англо-Австралийского телескопа, маленький кусочек неба, видимый сквозь отверстие купола, казался абсурдно ярким — в конце-то концов, ночному небу полагается быть темным! Поразительное явление, вызывающее свечение ночного неба — это зодиакальный свет, солнечный свет, рассеянный пылью в межпланетном пространстве.

В 1683 году Дж. Д. Кассини начал десятилетнее исследование зодиакального света. Он пришел к правильному выводу о том, что зодиакальный свет возникает в результате отражения солнечного света от пылевых частиц, которые образуют облако в виде толстой линзы с центром в Солнце, симметричной относительно главной плоскости солнечной системы. Дальнейшие соображения, опубликованные Д. Де Мэйраном в 1733 году, содержали уже правильное представление о том, что облако космической пыли простирается по крайней мере до орбиты Земли. При наилучших условиях видимости конус зодиакального света простирается вплоть до 60° от Солнца (которое в этот момент находится, естественно, ниже линии местного горизонта). Кажется удивительным, что наши знания об упоминаемой в поэзии и прозе «ложной заре» практически не изменились за три столетия после Кассини: у нас может быть больше данных, но модель его в основном верна.

Астрономы изучают зодиакальный свет по нескольким причинам. Одна из них — та, что зодиакальный свет является самым ярким протяженным источником света в небе низких земных широт, что позволяет легко измерять его характеристики. В частности, лишь получив спектр этого света, в котором были видны фраунгоферовы линии, мы смогли убедиться в том, что это действительно рассеянный солнечный свет, а не какое-то излучение другого, не связанного с Солнцем источника. Другая причина — в том, что зодиакальный свет дает нам метод, с помощью которого мы можем многое узнать о космической пыли, не посылая ракет в космос. Так как космическая пыль холодна и темна, единственным

источником информации о ее крупномасштабных свойствах является анализ рассеянного солнечного света. Большинство частиц в действительности имеют размеры где-то между 10 и 100 микронами; микрон — миллионная доля метра. Эта пыль напоминает чрезвычайно мелкий порошок, значительно более мелкий, чем песок. Вдохнув некоторое количество ее, мы могли бы задохнуться.

С космического корабля, летящего к Юпитеру, исследовались свойства зодиакального света за орбитой Земли. Непосредственно при пересечении пояса астероидов свет все еще был замечен, но когда космический корабль достиг расстояния, втрое превышавшего расстояние от Земли до Солнца, никакой свет уже не регистрировался. Один лишь тот факт, что пыль и отражаемый ею слабый свет простираются на значительные расстояния от Солнца, позволяет предполагать, что отраженный солнечный свет должен проследиваться вдоль всего темного ночного неба. И это действительно так. При сканировании фотометром вдоль эклиптики сигнал постепенно падает по мере возрастания углового расстояния от Солнца. Однако примерно на расстоянии в 150° от Солнца сигнал вновь возрастает и продолжает расти до тех пор, пока фотометр не достигает той точки на небе, в которой он нацелен в направлении, точно противоположном направлению на Солнце.

На больших угловых расстояниях от Солнца мы сталкиваемся с так называемым *Gegenschein* (слово это буквально означает «противосияние»), очень слабым отблеском света, наблюдаемым в направлении, противоположном направлению на Солнце, которое вызвано отражением солнечного света от пыли. Я никогда не видел противосияния, которое значительно слабее зодиакального света. Люди, которые видели его, говорят, что его поперечник составляет от 5 до 10° и оно имеет форму овала, большая ось которого направлена вдоль эклиптики.

Космическое пространство запылено главным образом из-за комет, вторгающихся внутрь солнечной системы. Как мы уже отмечали, при встречах с Солнцем кометы теряют газ и пыль, которые истекают из них в виде длинного хвоста, распускающегося под действием солнечного ветра. Кометы, чем бы они ни были, почти наверняка являются чрезвычайно древними членами солнечной системы, относящимися ко времени раннего образования твердых объектов, вращавшихся вокруг наполовину сформировавшегося Солнца. Многие вопросы, касающиеся комет, могли бы быть разрешены посредством запуска космического аппарата с целью перехвата одной из них; этот дорогостоящий метод должен быть

ограничен теми кометами, приход которых можно предсказать задолго до их появления из-за продолжительного периода планирования, необходимого для подготовки космических полетов. В то время когда пишется эта книга, не кажется совершенно невероятным, что мы в 1986 году попытаемся перехватить комету Галлея. Без сомнения, кометы содержат значительную долю пыли, и, как показали исследования их хвостов, они щедро разбрасывают ее в космическом пространстве во время своего путешествия сквозь солнечную систему, оставляя самые большие следы в тот период, когда они ближе всего к Солнцу.

В 1970-х годах вследствие полетов «Скайлэба» исследования внешней околосолнечной среды были особенно плодотворными. Уже при построении изображения короны в высокоэнергичном диапазоне излучения со спутника ОСО-7 была выявлена ее большая сложность. На рентгеновских фотоснимках были замечены рассеянные по диску яркие точки и темные дыры в короне вместе с протянувшимися высоко в корону арками и петлями магнитного поля. Структура внешней короны действительно определяется магнитным полем, которое формирует потоки плазмы, вытягивающиеся от Солнца в виде щеток, шлемов и напоминающих языки пламени протуберанцев.

Как Секки понял уже в 1875 году, структура короны изменяется с солнечным циклом. К 1896 году К. А. Янг отождествил отличающиеся друг от друга характерные особенности максимального и минимального типов корональной структуры. Во время минимальной фазы, как мы уже отмечали, корона невыразительна. Относительно слабый свет дают структуры плазменных потоков, возникающие на низких широтах (вблизи солнечного экватора), и короткие щеточки. Потоки находятся над активными областями.

В периоды солнечной активности мы видим, что над полюсами Солнца существуют полярные щеточки, заметные во время интервалов минимальной солнечной активности. Эти вертикальные колонны плазмы достигают 8000 км в поперечнике и простираются до удивительных высот в полмиллиона километров. Над активными областями видны структуры, называемые шлемами; их верхние концы сходятся под острым углом в точке, находящейся на расстоянии одного или двух солнечных радиусов над поверхностью Солнца. Иногда над группами солнечных пятен вырастают огромные активные лучи — стримеры, на фотоснимках, полученных во время затмения, эти лучи можно проследить на протяжении пяти солнечных радиусов и дальше. Все эти поразительные детали корональной структуры — шлемы, щеточки, арки

и лучи — по существу формируются внешним магнитным полем.

В фантастическом богатстве форм корональной структуры убеждают нас ультрафиолетовые и рентгеновские изображения, вроде тех, что были получены на «Скайлэбе». Как мы уже видели, корона чрезвычайно горяча и по существу прозрачна для излучения в оптической области спектра; во время затмений мы смотрим на корону сбоку. Для того чтобы получить изображение анфас, нужно использовать рентгеновские лучи, так как ободранные до самых нижних электронных оболочек атомы в короне излучают главным образом в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Эти ободранные атомы, называемые ионами, потеряли свои внешние электронные оболочки в раскаленной среде. Оставшиеся электроны совершают большие скачки между энергетическими уровнями атома, скачки, которые приводят к излучению больших порций энергии, в виде рентгеновских фотонов. Другим существенным фактором является то, что характер рентгеновского излучения весьма чувствительно зависит как от температуры, так и от электронной плотности; из обратного утверждения следует, что, построив изображение короны в рентгеновском диапазоне, мы сможем получить распределения температуры и плотности в короне. Действительно, интенсивность рентгеновского излучения определяется квадратом электронной плотности, тогда как интенсивность белого света зависит от того же количества электронов лишь линейно. Это одна из причин, объясняющих, почему на рентгеновских изображениях видны горячие или плотные области в короне с очень хорошим контрастом.

На рентгеновских фотоснимках солнечной короны большие и яркие области лежат над активными областями в фотосфере. Очевидно, что сильное и сложное магнитное поле определяет также и поток энергии в короне над активной областью. Петли, связывающие области противоположной магнитной полярности, выделяются очень хорошо.

На этих же снимках видны маленькие яркие точки рентгеновского излучения. Сопоставляя рентгеновские фотоснимки и магнитограммы, полученные в одно и то же время, легко заметить, что эти рентгеновские точки связаны с биполярными магнитными областями. Магнитные области, определяющие существование ярких рентгеновских точек, столь компактны, что инструменты сегодняшнего дня не позволяют отделить маленькие компактные петли магнитного поля, заполненные перемещающейся внутри этих петель горячей рентгеновской плазмой, от самых точечных источников. Рентгеновские точки существуют совсем недолго, затухая в

течение нескольких часов. Яркие точки должны быть связаны с обычными активными областями, но по какой-то причине они существуют значительно более короткое время. Как и солнечные вспышки, они быстро зажигаются. Но в одном очень важном отношении они отличаются от активных областей; они рассеяны по всему Солнцу, а не ограничены подобно солнечным пятнам приэкваториальной зоной активности. Астрофизики предполагают, что яркие рентгеновские точки вносят существенный вклад в выносимый из Солнца магнитный поток. Вероятно, они выносят столько же магнитного поля, сколько и обычные активные области. Разбросанные подобно драгоценным камням по всему Солнцу, яркие точки столь многочисленны, что, возможно, большая часть солнечного магнетизма сосредоточена именно в них.

Наиболее интересным открытием, сделанным при исследовании нашей ближайшей звезды с использованием высокоэнергичного спектра излучения, является, вероятно, открытие корональных дыр. Корональные дыры — это области, которые выглядят темными в условном цвете монохроматических рентгеновских фотоснимков, огромные корональные области, которые не излучают никакого рентгеновского излучения. В чем причина этого?

Корональные дыры впервые были обнаружены в начале 1970-х годов, сначала при наблюдениях в ультрафиолетовом диапазоне излучения. Первые ракетные исследования показали, что их название «дыры» противоречит действительности, так как плотность горячего газа в корональной дыре составляет около одной трети от нормальной плотности короны спокойного Солнца. Неверно это и в отношении всего остального: температура дыры примерно лишь в два раза меньше температуры остальной части короны. Переходная зона между хромосферой и короной в области дыры значительно толще. В те времена, когда астрономы могли проводить свои наблюдения лишь с Земли, дыры были хорошо укрыты от их глаз. Наблюдая свет дневной звезды из-под атмосферы, которая поглощает высокоэнергичное излучение, астрономы ничего не могли знать об их существовании, так как дыры не оказывают почти никакого влияния на фотосферу или нижнюю хромосферу. Вся кипящая поверхность Солнца, ее грануляция и супергрануляция, содрогание и трепет колеблющегося Солнца, ничем не отличаются в области дыры от аналогичных характеристик остальной части Солнца. Единственная отличительная особенность корональной дыры следует из рассмотрения ее магнитного поля, которое внутри корональных дыр разомкнуто и открыто во внешнее межпланетное пространство. В сущности корональная дыра — это

очень большая область короны, которая холодна и имеет низкую плотность. В области корональной дыры слабое магнитное поле, расширяясь, вытягивается в направлении от Солнца. Таким образом, дыры являются важным источником солнечного ветра.

Рассмотрим теперь несколько детальнее баланс энергии в корональной дыре. Корона — это, вообще говоря, очень разреженный, очень горячий, самый внешний слой солнечной «луковицы». Взаимодействуя с окружающей средой, она передает энергию солнечного излучения в высшей степени холодной Вселенной, температура которой лишь на три градуса выше абсолютного нуля. Тепловая энергия, необходимая для поддержания корональной температуры на двухмиллионной отметке, обеспечивается за счет механических волн, которые, распространяясь из хромосферы в корону, превращаются в ударные и, взаимодействуя друг с другом, рассеиваются в ней. Дополнительный вклад в общий баланс энергии вносят и различные явления, связанные с солнечной активностью. В устойчивом состоянии корона по существу устойчива, и все, что в нее поступает, должно уходить из нее. Возникает проблема: дыры холоднее, почти на миллион градусов холоднее, чем остальная часть короны, так что они не могут излучать так же эффективно, как остальная корона. К тому же более медленное изменение температуры с высотой в переходной зоне означает, что теплопроводность из короны назад в хромосферу значительно отличается от нормальной. Таким образом, корональная дыра на каждом из своих концов, по-видимому, имеет по пробке. Одна из них уменьшает поток тепла, передаваемый за счет теплопроводности из короны в хромосферу, другая — уменьшает скорость, с которой тепло уходит из короны в холодную Вселенную. Тем не менее дыры устойчивы (согласно наблюдениям со «Скайлэба», продолжительность их существования достигала девяти месяцев), так что они должны каким-то образом избавляться от энергии.

Решение проблемы дает дальнейшее рассмотрение влияния открытого или расходящегося магнитного поля на солнечный ветер. В открытых областях, таких, например, как корональные дыры, истечение ветра происходит без каких-либо усилий, потому что ему не нужно увлекать за собой магнитное поле. Избыточная энергия не удерживается вообще: Солнце использует ее для того, чтобы вытолкнуть солнечный ветер из корональных дыр (основного источника ветра) в межпланетное пространство. Между прохождением по диску рентгеновского Солнца корональных дыр и приходом к Земле потоков высокоскоростных частиц в периоды усиления

солнечного ветра существует точное соответствие. Ученые, наблюдавшие со «Скайлэба» корональные дыры, установили, что в том случае, когда делается поправка на несколько дней, необходимых для того, чтобы поток частиц в ветре достигал Земли, соответствие между дырами и потоками частиц очень хорошее. Отсюда следует, что дыры определенно оказывают на ветер заметное влияние. Они также косвенно влияют на изменение собственного магнитного поля Земли, а следовательно, имеют для нас на Земле практическое значение.

Вид Солнца со стороны полюсов может быть еще более интересным. В настоящее время мы не можем с легкостью заглянуть на Солнце со стороны его северного или южного полюсов, хотя кое-что восстановить можно, внося соответствующие геометрические коррективы в вид тех чрезвычайно искаженных перспективой приполярных областей Солнца, которые доступны нашим наблюдениям с Земли. Случается, что дыры существуют и на полюсах. Во время полета «Скайлэба» в 1973 году одну из таких дыр можно было наблюдать в течение восьми месяцев. Она была настолько устойчива, что должна была быть очень эффективным источником солнечного ветра. Радиоастрономы, проводящие наблюдения далеких галактик и квазаров, подтверждают, что с их полюсов дует ветер. Вполне возможно, что этот основной поток с полюсов значительно более впечатляющ, чем та доля солнечного ветра, которую мы в виде экваториального потока и можем лишь измерять с Земли с помощью спутников или космических зондов. Существует интересное предложение послать космический корабль таким образом, чтобы он вышел из плоскости эклиптики и прошел над Солнцем с тем, чтобы посмотреть на один из полюсов. Этот внеэклиптический зонд необходимо, вероятно, направить сначала к гигантской планете Юпитер. Затем, как при игре в гигантский межпланетный бильярд, сильное гравитационное поле Юпитера должно резко развернуть корабль при его сближении с Юпитером и направить вверх от плоскости эклиптики. Тогда астрономы смогут провести прямые измерения плотности и скорости ветра над полюсами.

Солнце и Земля

Очевидно, что для человечества Солнце — небесное тело, оказывающее наибольшее влияние на Землю. В этой главе мы рассмотрим некоторые из путей воздействия излучения и частиц от Солнца на Землю, ее атмосферу и даже на нас.

Тепло и свет от Солнца согревают и освещают космический корабль «Земля», который был бы просто покрытой льдом холодной скалой, если бы его отодвинули от Солнца на расстояние, в десять раз превышающее теперешнее. Кроме этого хорошо знакомого теплового воздействия, Солнце влияет на Землю и другими, более тонкими способами: оно меняет состав и структуру внешних слоев атмосферы, деформирует магнитное поле в окрестности Земли и создает незабываемые картины полярных сияний. Ветвь астрономии, которая пытается понять сложные и многообразные взаимодействия между Землей и Солнцем, мы будем называть солнечно-земной физикой.

Примерно в 80 километрах над континентами и океанами начинается слой нашей атмосферы, называемый ионосферой. Ионосфера может простираться вплоть до высоты 1000 км. В этой области коротковолновое излучение Солнца, а также естественное космическое излучение (высокоэнергичные частицы, приходящие к нам из областей Вселенной, находящихся далеко за пределами Солнечной системы) взаимодействуют с атомами и молекулами атмосферы. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, высокоэнергичные частицы обладают энергией, достаточной для того, чтобы выбить электроны из атмосферных атомов и молекул и превратить их в свободные частицы. Поэтому эта часть атмосферы ионизована; она состоит из электрически заряженных атомов и молекул, а также свободных электронов. Область ионосферы богата кислородом и имеет высокую температуру — выше 1000 К. Но воздух здесь столь разрежен, что, вопреки этой высокой температуре, он ничего не нагревает; температуру следует рассматривать лишь как меру скорости движения ионов и электронов. Так как Солнце является основным источником ионизирующего излучения, разнообразные измеренные характеристики ионосферы меняются с изменением степени активности Солнца. Когда на Солнце мир

и спокойствие, электронная плотность и протяженность ионосферы уменьшаются. Однако большие солнечные вспышки меняют это состояние и приводят ионосферу в возбужденное состояние.

До ракетного века ионосферу можно было исследовать лишь с помощью радиоволн. Однако в настоящее время, в эру спутниковых трансконтинентальных телевизионных передач телефонной и радиосвязи, легко забыть, что когда-то радиопередачи на большое расстояние полностью зависели от ионосферы. Так как эта область содержит много свободных электронов, она является хорошим проводником электричества. вследствие чего радиоволны с большой длиной волны отражаются от нее, как и от металлического экрана. Таким образом, радиосвязь с пунктами, находящимися за горизонтом, осуществляется за счет отражения радиоволн от нижней поверхности электропроводящей ионосферы. Такая связь причиняет довольно много неудобств, потому что ионосферный слой меняется в течение дня и зависит от времени года и уровня солнечной активности.

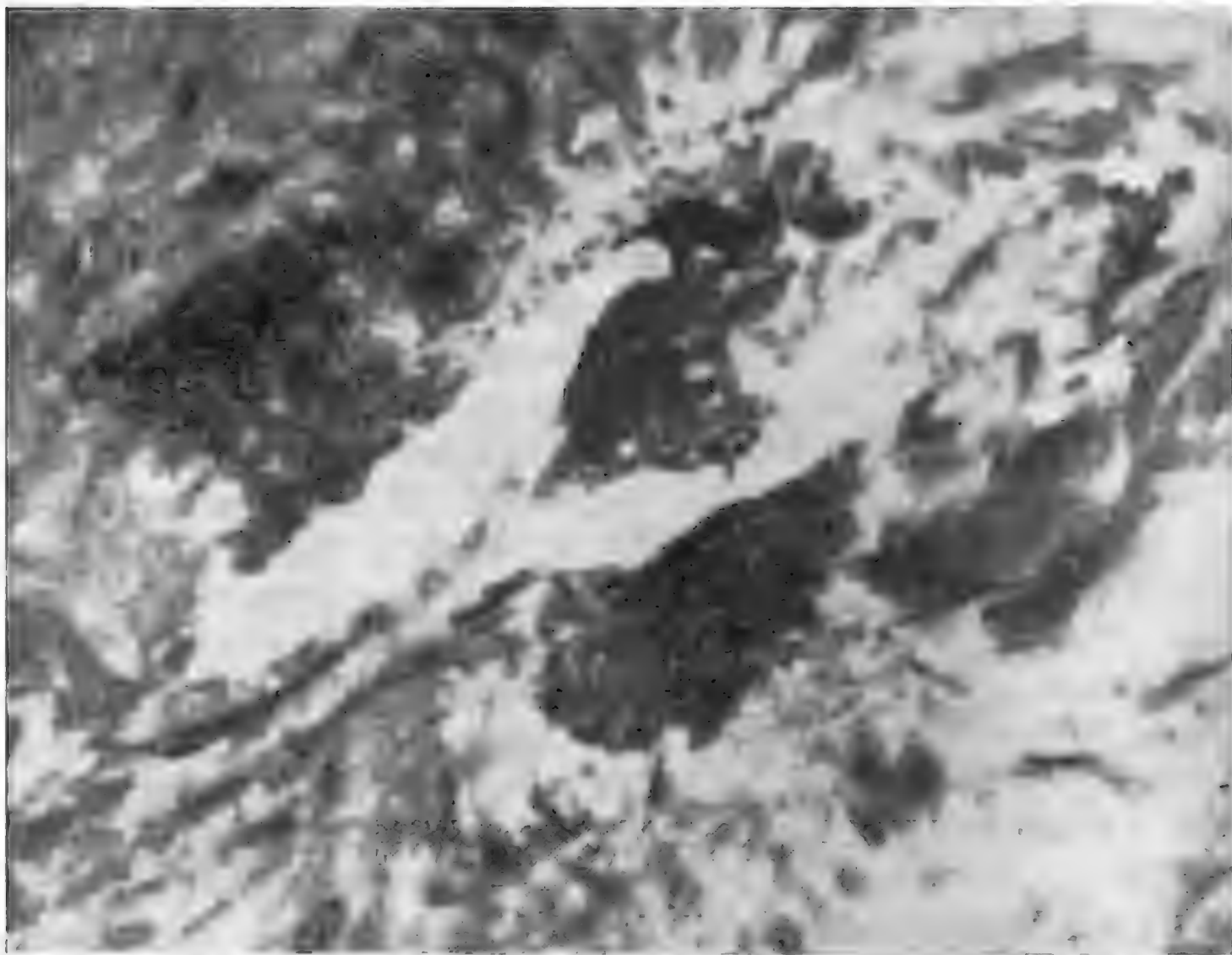
Именно ионосфера в основном не пропускает космическую радиацию (частицы, рентгеновское и ультрафиолетовое излучение), весьма опасную для человеческой жизни. Иногда мы говорим, что ионосфера защищает нас от вредного воздействия солнечной радиации. Хотя верхняя атмосфера и обеспечивает эту защиту, важно сознавать, что сложная сегодняшняя жизнь на Земле развивалась из более простых форм в среде, подвергавшейся очень слабому воздействию ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Если бы ионосфера хуже защищала нас от внешних воздействий, жизнь, вероятно, развивалась бы иначе и организмы уже на стадии своего возникновения вынуждены были бы выработать у себя лучшую систему защиты от воздействия Солнца. Действительно, существуют простые примеры такого приспособления: темнокожие расы возникли в тропиках и темный цвет тела приобрели в силу необходимости защищаться от тех ультрафиолетовых лучей, которые не были поглощены воздухом уже ранее. Светлокожие люди могут приобрести темную пигментацию, подвергнув свою обнаженную кожу воздействию сильного солнечного света, но, если Вы — светлокожий, Вы, вероятно, на своем горьком опыте убедились, что стать темным можно лишь через несколько дней! Из-за того что жизнь развивалась под этим защитным покровом, мы не обладаем никакой естественной защитой от прямого воздействия Солнца. По этой причине и по ряду других необходимо, чтобы как космический корабль, так и одежда путешественников в космосе имели специальный защитный экран.

Доза облучения, получаемая экипажами сверхзвуковых самолетов, летающих на очень больших высотах, должна непрерывно контролироваться медицинским персоналом. Пассажиры подвергаются меньшему риску даже в периоды высокой солнечной активности, так как они совершают значительно меньше высотных путешествий.

После большой солнечной вспышки резко возрастает число высокоэнергичных частиц в окрестности Земли. Частицы, обладающие самой высокой энергией,— это протоны, выбрасываемые из Солнца со скоростью, близкой к скорости света. При сильной вспышке часть активной области действует подобно ускорителю частиц или установке для расщепления атомного ядра. Эти релятивистские протоны достигают Земли почти в то же время, когда мы обнаруживаем вспышку с помощью наших телескопов. Они вторгаются в атмосферу и с большой силой сталкиваются с атомами. При этом возникают нейтронные ливни, которые обнаруживаются с помощью наземных инструментов. Мощная солнечная вспышка вызывает увеличение скорости счета нейтронов на уровне Земли в десять — двадцать раз. Эти нейтроны не причинят Вам вреда, но вот протонам, движущимся со скоростью света, не потребуется много времени для того, чтобы уничтожить Вас мучительной смертью. По этой причине за поведением Солнца обычно и ведется столь тщательное наблюдение, когда астронавтам необходимо выполнить какую-то работу непосредственно в космическом пространстве или на Луне, в то время как они защищены одними лишь скафандрами.

Солнце и его меняющееся излучение ответственны за некоторые из явлений, мешающих радиолюбителям. В качестве лишь одного примера приведем затухание на коротких радиоволнах. Это — внезапное прекращение приема радиопередач на коротких волнах. Оно происходит тогда, когда Солнце вызывает повышенную ионизацию в самом нижнем слое ионосферы, который и поглощает сигнал. На очень низких частотах отражающие свойства ионосферы значительно лучше, поэтому низкочастотные электромагнитные волны, генерируемые во время естественных гроз, легко преодолевают большие расстояния. Это приводит к значительному росту регистрируемого числа гроз, треск от которых в виде атмосфериков принимается радиоприемником.

Выше атмосферы и ионосферы чрезвычайно существенно влияние Солнца на ту неосязаемую магнитную оболочку — земную магнитосферу, которая как броня защищает нашу планету от непрерывной бомбардировки ее атомными частицами солнечного ветра. Магнитосфера является результатом



Солнечная вспышка 10 сентября 1974 г. — типичный пример этого явления. Белый свет очерчивает саму вспышку — потенциальный источник частиц высокой энергии, испускаемых Солнцем. (Обсерватория Сакраменто-Пик, США.)

взаимодействия собственного магнитного поля Земли с магнитным полем и электрическими токами, порождаемыми солнечным ветром.

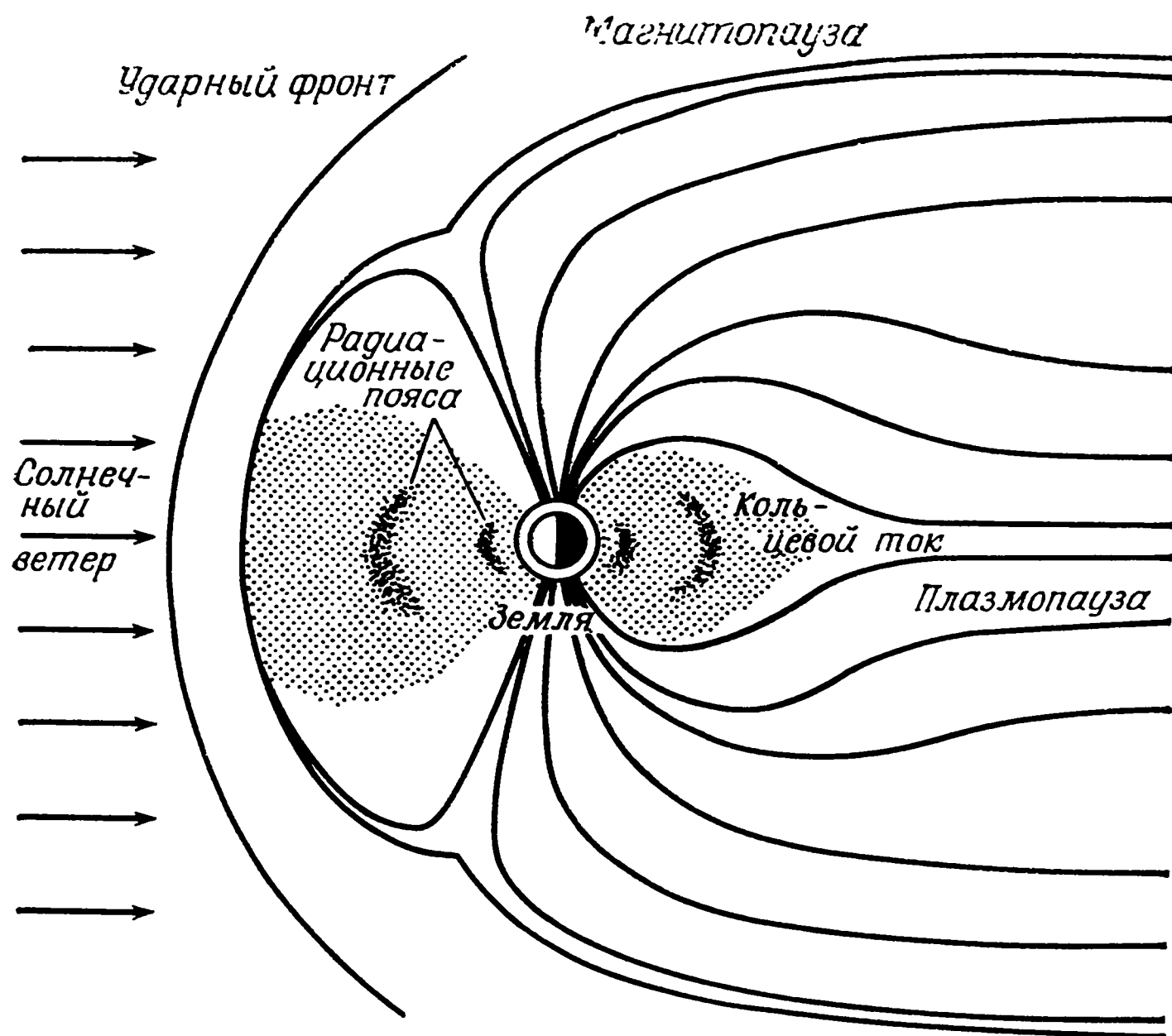
Начнем с рассмотрения магнитного поля Земли. В настоящее время поле, регистрируемое на поверхности Земли, может быть легко смоделировано в предположении о том, что где-то более или менее в центре нашей планеты находится магнитный диполь (стержневой магнит в виде железного бруска). На самом деле внутри ее, конечно же, нет никакого постоянного железного магнита: поле, по-видимому, генерируется и поддерживается электрическими токами, текущими внутри жидкого ядра Земли, но на поверхности и вне ее оно подобно полю стержневого магнита. Магнитный диполь Земли наклонен к оси ее вращения примерно на 11° и отстоит от действительного центра Земли приблизительно на 500 километров. В результате северный магнитный полюс находится в Гренландии, а южный — в Антарктиде. В нынешние времена напряженность поля уменьшается довольно медленно с постоянной скоростью. Если так будет продолжаться и дальше, примерно через 2000 лет поле об-

ратится в нуль. Из исследований реликтового магнитного поля, зафиксированного в горных породах, мы знаем, что напряженность и направление геомагнитного поля изменялись на протяжении всего геологического периода жизни Земли. Магнитное поле Солнца меняет свое направление на противоположное каждые 11 лет вследствие той перестройки, которую испытывает динамо. Внутри Земли свойства магнитного поля изменяются значительно медленнее и, по-видимому, не являются регулярными.

Магнитное поле, измеренное в любой точке на поверхности Земли, складывается из собственного поля Земли и магнитного поля, связанного с Солнцем и тем веществом, истекающим из Солнца, которое при своем движении наталкивается на Землю или обтекает ее. Так как неистовое Солнце может меняться в течение минут, напряженность или направление измеряемого магнитного поля не являются строго постоянными.

Очень заметно меняется горизонтальная компонента поля, когда происходит сильное уменьшение его напряженности. Эти внезапные резкие спады напряженности поля, более известные под красочным названием «геомагнитных бурь», могут продолжаться несколько дней. В течение всего этого времени чувствительный магнитный компас ведет себя настолько неустойчиво, что его показания могут казаться ошибочными. Сейчас мы уже знаем, что эти бури не вызваны какими-то внезапными изменениями внутри нашей собственной планеты. Напротив, виновником является Солнце, так как флуктуации поля (и стрелки компаса) обусловлены приходом к Земле высокоскоростных потоков солнечной плазмы, выброшенных во время большой солнечной бури. Активные области могут существовать на Солнце в течение более чем одного солнечного оборота. В этом случае связанная с ними геомагнитная буря также может повториться снова через двадцать семь суток, составляющих полный оборот Солнца вокруг своей оси относительно Земли. Большие геомагнитные бури связаны также и с возмущениями в ионосфере, которые вызывают временное прекращение приема радио- и телевизионных передач, так как и бури, и возмущения в ионосфере определяются по существу одними и теми же солнечными явлениями.

Поскольку солнечный ветер постоянно обтекает нашу планету, он создает полость, заключающую внутри себя геомагнитное поле, которое в противном случае простиралось бы далеко в космическое пространство. По сравнению с самой Землей магнитосфера велика. Со стороны, обращенной к Солнцу, ее граница отстоит от Земли примерно на десять



Земная магнитосфера — это магнитное поле Земли, деформированное солнечным ветром. Наша планета окружена магнитной оболочкой, отражающей заряженные частицы, идущие от Солнца.

земных радиусов. Существует внешний пограничный слой, называемый магнитопаузой, толщиной примерно 100—200 км. С ночной стороны нашей планеты магнитосфера очень сильно вытянута — на 1000 земных радиусов — подобно хвосту кометы. Фактически она незаметно сливается с межпланетным магнитным полем. На этой стадии наших рассуждений, возможно, будет полезным представить себе магнитосферу в виде окружающего Землю магнитного скелета. Сразу же за границей магнитосферы существует еще другая, особая область взаимодействия, называемая магнитослоем — тело поверх скелета. Магнитослой — это область пространства, где частицы солнечного ветра обтекают магнитосферу. В саму магнитосферу частицы почти не проникают. На переднем крае магнитослоя, обращенного к Солнцу, существует стоячая ударная волна. Она напоминает ударную волну, или тот звуковой удар, который сопровождает сверхзвуковой самолет. Обычно, когда обладающая магнитным полем планета находится внутри потока солнечного ветра, ударный фронт возникает из-за того, что ветер обтекает пла-

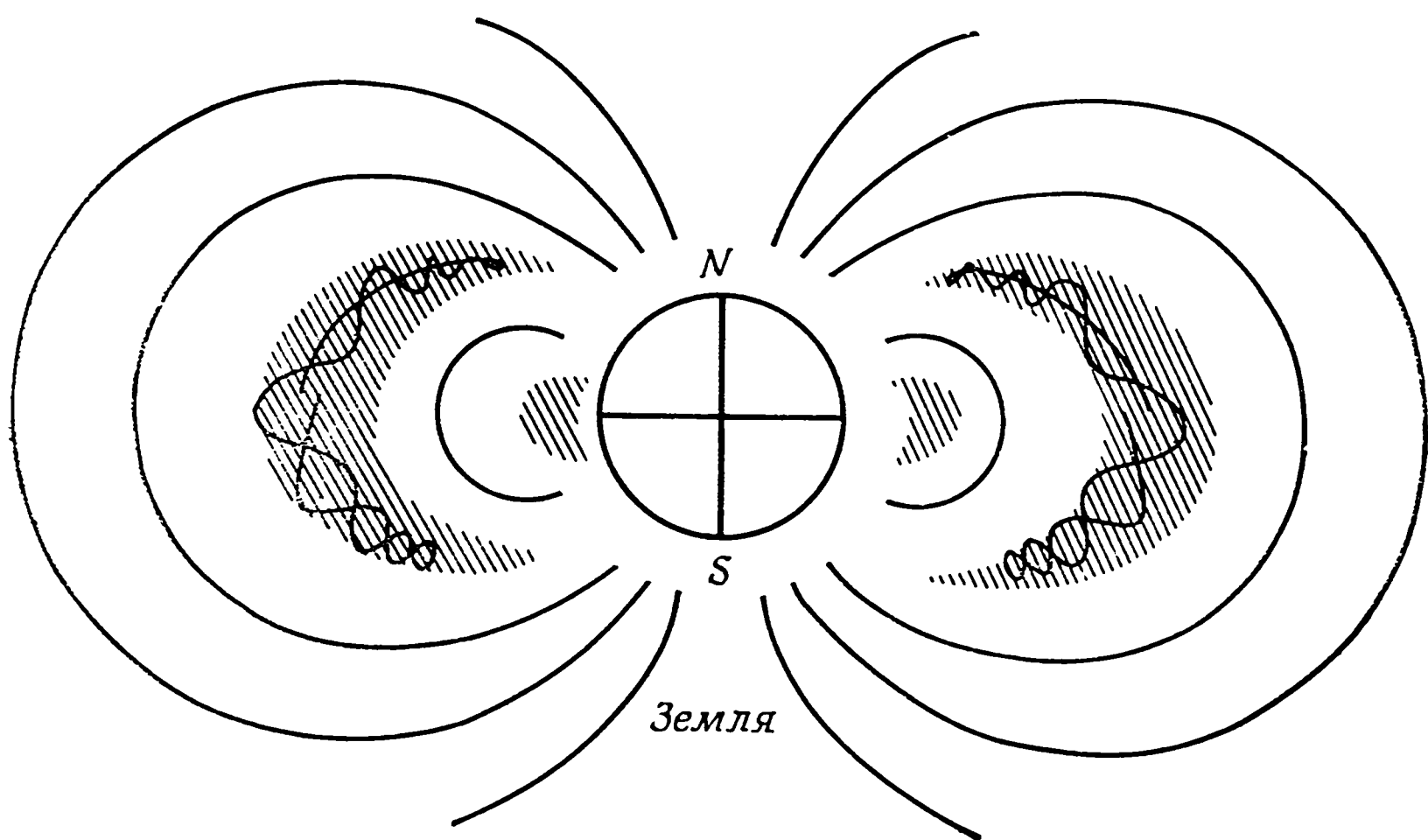
нету со скоростью, большей скорости звука в ветре. Это в точности та же физическая ситуация, что и в случае ударной волны, возникающей, когда самолет движется быстрее скорости звука в воздухе. Одной из особенностей этой магнитной ударной волны вблизи Земли является то, что она того типа, который очень трудно создать в лаборатории: бесстолкновительная гидромагнитная ударная волна.

Запущенные в дальний космос ракеты «Пионер-10 и -11» и космический корабль «Вояджер» проходили мимо Юпитера. Эта планета обладает значительно более протяженной, чем у Земли, магнитосферой. Полеты позволили получить независимую информацию о природе планетных магнитосфер. У Сатурна также есть магнитное поле, простирающееся далеко в космическое пространство.

Ту часть магнитосферы, которая обращена в направлении от Солнца, называют по-разному: «геомагнитный хвост», «магнитосферный хвост» или более просто «хвост магнитосферы». Хвост этот, скорее, напоминает две прижатые друг к другу трубки. В верхней трубке магнитное поле направлено к Солнцу, в нижней — от Солнца. Там, где две трубки соприкасаются, находится нейтральная область, так как противоположно направленные поля в большей или меньшей степени взаимоуничтожают друг друга.

Конечно, магнитосфера не является совершенно непроницаемым барьером — частицы отклоняются от своего пути вблизи Земли (мы уже упоминали о тех эффектах, которые они вызывают в ионосфере). Движение заряженных электрических частиц в дипольном магнитном поле Земли таково, что частицы с соответствующей энергией могут захватываться этим полем и почти бесконечно двигаться вокруг Земли в радиационных поясах. Внутренний радиационный пояс был открыт и его форма была выведена Дж. А. Ван Алленом в 1958 г. С помощью простых детекторов заряженных частиц на борту первого американского искусственного спутника «Эксплорер-1» не удалось зарегистрировать частицы выше 1000 км. Позднее лабораторные испытания и дальнейшие спутниковые наблюдения показали, что нулевой отсчет в действительности был всего лишь результатом того, что детекторы были полностью зашкалены в радиационных поясах. Внутренний пояс заполнен главным образом протонами, в то время как более протяженный внешний пояс содержит также и электроны.

Захват частиц радиационными поясами происходит вследствие того, что электромагнитные силы вынуждают заряженные частицы двигаться по спирали вдоль силовых линий магнитного поля. Вблизи полюсов магнитного поля силовые



Магнитное поле и радиационные пояса Земли.

линии сходятся вместе, образуя воронку, и на движущиеся по спирали частицы начинает действовать сила бокового сжатия. В результате образуется магнитное зеркало: частицы носятся взад и вперед от полюса к полюсу, проходя весь путь от одного полюса до другого самое большее за несколько секунд. Для того чтобы более ясно понять природу этих поясов, в 1958 и 1962 годах были выполнены эксперименты, которые в настоящее время кажутся безответственными. В космическом пространстве были взорваны ядерные бомбы с целью создать искусственные пояса заряженных частиц. В конце концов такая самодеятельность во внешнем космическом пространстве была прекращена международным соглашением. Взрыв, произведенный в рамках проекта «Старфиш» в 1962 г., создал радиационный пояс, который существовал в течение нескольких лет. Безрассудство этих упражнений стало особенно убедительным тогда, когда поняли, что в результате последствий этого взрыва несколько дорогостоящих спутников по существу были выведены из строя из-за повреждения панелей солнечных батарей.

Другой аспект физической связи между Солнцем и Землей проявляется в виде мерцающего света полярных сияний. Связь явления полярных сияний с магнитной активностью на Земле в действительности была установлена еще в XVIII веке. Теперь мы уверены в том, что активное Солнце ответственно за оба этих явления и что недостаток солнечных пятен во время минимума Маундера сопровождался от-



Полярное сияние — прекрасное напоминание о постоянном взаимодействии между Землей и Солнцем. (Л. Снайдер, Аляскинский университет.)

существом наблюдаемых проявлений полярных сияний с 1645 по 1715 год.

Большая часть света полярных сияний излучается атомами водорода и молекулами азота, которые возбуждаются за счет столкновений с низкоэнергичными электронами. Возмущения магнитного поля в хвосте магнитосферы вытряхивают электроны из хвоста в направлении Земли, где они и высыпаются на высоких широтах в области магнитных полюсов. На самом деле электроны при своем движении концентрируются в тонких слоях, что придает многим сияниям характерный вид свисающих штор. В действительности же реальные формы полярных сияний классифицировать трудно, хотя ученые и называют их по-разному — дуги, ленты, лучи и вуаль. Размеры могут меняться в очень широких пределах. Обычно они наблюдаются на высотах 100—150 км и по горизонтали могут иметь размеры от десятков метров (лучи полярного сияния) до тысяч километров (дуги или полосы).

Зоны полярных сияний, в которых наблюдателями на Земле отмечена наибольшая активность, находятся на широтах

67° к северу и югу от экватора и имеют ширину около 6°. Действительные размеры овальной области вокруг магнитного полюса, в которой происходят сияния, меняются. Ночью она обычно удалена от полюса на 22° или около того; это противоречит общепринятой, но неправильной точке зрения о том, что полярные сияния происходят над геомагнитным полюсом. Они образуют широкий овал, окружающий полюс.

Вследствие той связи, которая существует между полярными сияниями, свойствами магнитосферы и солнечной активностью, проявления полярных сияний зависят от солнечного цикла, 27-суточного среднего периода вращения Солнца вокруг своей оси, времени года и общего уровня магнитной активности. Обобщая вышесказанное, можно сказать, что наиболее эффективные полярные сияния наблюдаются вблизи максимума солнечной активности. Однажды во время полета из Лос-Анджелеса в Лондон по полярному маршруту, пересекавшему Южную Гренландию, я видел на 67° с. ш. удивительное полярное сияние в виде зеленых занавесей, мерцавших в лунном свете.

Цвет полярных сияний обычно красный или зеленый. Красный цвет излучается атомами кислорода, зеленый — молекулами азота. Излучение заметно также в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах.

Солнце, таким образом, оказывает заметное воздействие на магнитную оболочку Земли. А как обстоит дело с окутывающей Землю атмосферой? Несомненно, Солнце должно действовать и на нее тоже. В последние годы поразительно вырос интерес к изменениям климата на Земле, причинам климатических изменений и прогнозу будущих тенденций изменения климата. Хотя в общем-то является общепринятым то, что астрономические факторы могут оказывать заметное влияние на климат, нет какого-либо определенного доказательства того, что какое-нибудь отдельное климатическое «событие» в прошлом, такое, например, как эпоха оледенения, может быть приписано астрономическим факторам. Одна из трудностей связана с тем, что хорошие данные о явлениях на Солнце у нас имеются всего лишь за последние три столетия, а тщательные измерения светимости Солнца охватывают менее одного столетия. Эти периоды времени слишком малы по сравнению с характерным временем климатических изменений на Земле, которое, по-видимому, характеризуется более длительными (несколько столетий) промежутками. Следовательно, для того, чтобы охватить данными достаточно продолжительный период, мы должны опираться на информацию о климате и об астроно-

мических явлениях, полученную еще в те времена, когда инструментов для наблюдений не существовало. Мне, как астроному и неклиматологу, казалось, что получить достаточно надежную информацию о характеристиках как климата, так и Солнца за прошедший период трудно, хотя я никоим образом не хочу этим сказать, будто достижения в наших знаниях о Солнце и климате не были впечатляющими. Нет никакого сомнения в том, что климат менялся и продолжает меняться. Геологи отождествили несколько ледниковых периодов за последние 3 миллиона лет, в течение которых толстый слой льда покрывал значительную часть континентов. По геологической шкале времени лед отступил лишь недавно. Но причина ледниковых периодов все еще представляет собой предмет значительных разногласий, и мы не знаем, имеет ли отношение к этой проблеме влияние космоса или Солнца.

Так как это книга по астрономии, то прежде чем искать связь между Солнцем и климатом, я приведу свидетельства изменений Солнца. С некоторыми из этих свидетельств мы уже встречались в более ранних главах при рассмотрении солнечного цикла. Свидетельства отсутствия солнечной активности в XVII веке в период Маундеровского минимума очень убедительны и основаны на исторических записях. В 1960-х годах появился новый метод исследования солнечных вариаций в прошлом вплоть до нескольких тысяч лет назад. В его основе лежит метод измерения количества радиоактивного углерода в старых деревьях.

Радиоактивный углерод, или углерод-14, образуется в верхней части атмосферы Земли, там, где в атмосферу вторгаются пришедшие из дальнего космоса высокоэнергичные заряженные частицы. Когда Солнце активно и на нем много пятен, оно имеет протяженное магнитное поле. Это поле защищает внутреннюю Солнечную систему от высокоэнергичных космических лучей. Когда же Солнце спокойно, его магнитное поле обеспечивает худшую защиту. Тогда на планету попадает больше высокоэнергичных частиц и в верхней части атмосферы образуется больше углерода-14. Этот изотоп углерода имеет период полураспада 5730 лет, так что, если он где-либо был изолирован и накоплен (например, в древесине), можно определить, сколько углерода-14 было там вначале, при условии что он был захвачен не более нескольких тысяч лет назад.

Углерод-14 накапливается в деревьях. Рост растений определяется тем, что они поглощают из атмосферы двуокись углерода и под воздействием солнечного света образуют клетчатку (в состав молекул которой входят многочисленные атомы

углерода) в виде вновь нарастающей древесины. Эта клетчатка откладывается каждый год внутри дерева в виде колец, содержащих небольшое количество углерода-14, поглощенного вместе с обычным углеродом.

Деревья-долгожители, такие, например, как известные секвойи, могут таким образом вести солнечную летопись в течение нескольких тысяч лет.

У этого метода существуют и ограничения. В конечном счете запись постепенно стирается за счет естественного распада углерода-14, так что на практике по кольцам деревьев можно собрать данные лишь за последние 7500 лет. Более серьезной проблемой является то, что углерод-14 образуется в верхней части атмосферы, в то время как деревья растут внизу. Поэтому циркуляция радиоуглерода очень сложна. В частности, поглощение и растворение радиоуглерода в океанах сглаживают изменения содержания радиоуглерода за периоды меньше двадцати лет. В результате этого нет никаких четких признаков того, что по данным о радиоуглероде можно проследить солнечный одиннадцатилетний цикл. Большим триумфом метода, однако, было то, что измерения радиоуглерода отчетливо выявили минимум Маундера, так же как и ранее подозревавшийся период отсутствия активности в 1450—1540 годах н. э. и период заметной активности в XX веке. Основные изменения, продолжающиеся в течение нескольких солнечных циклов, в том числе и в течение тех периодов, когда исторические записи неопределенны, по-видимому, будут зафиксированы радиоактивной летописью в деревьях, поэтому попытка прочесть эту летопись за период, предшествующий тому времени, когда существуют и свидетельства в виде исторических записей, возможно, имеет смысл.

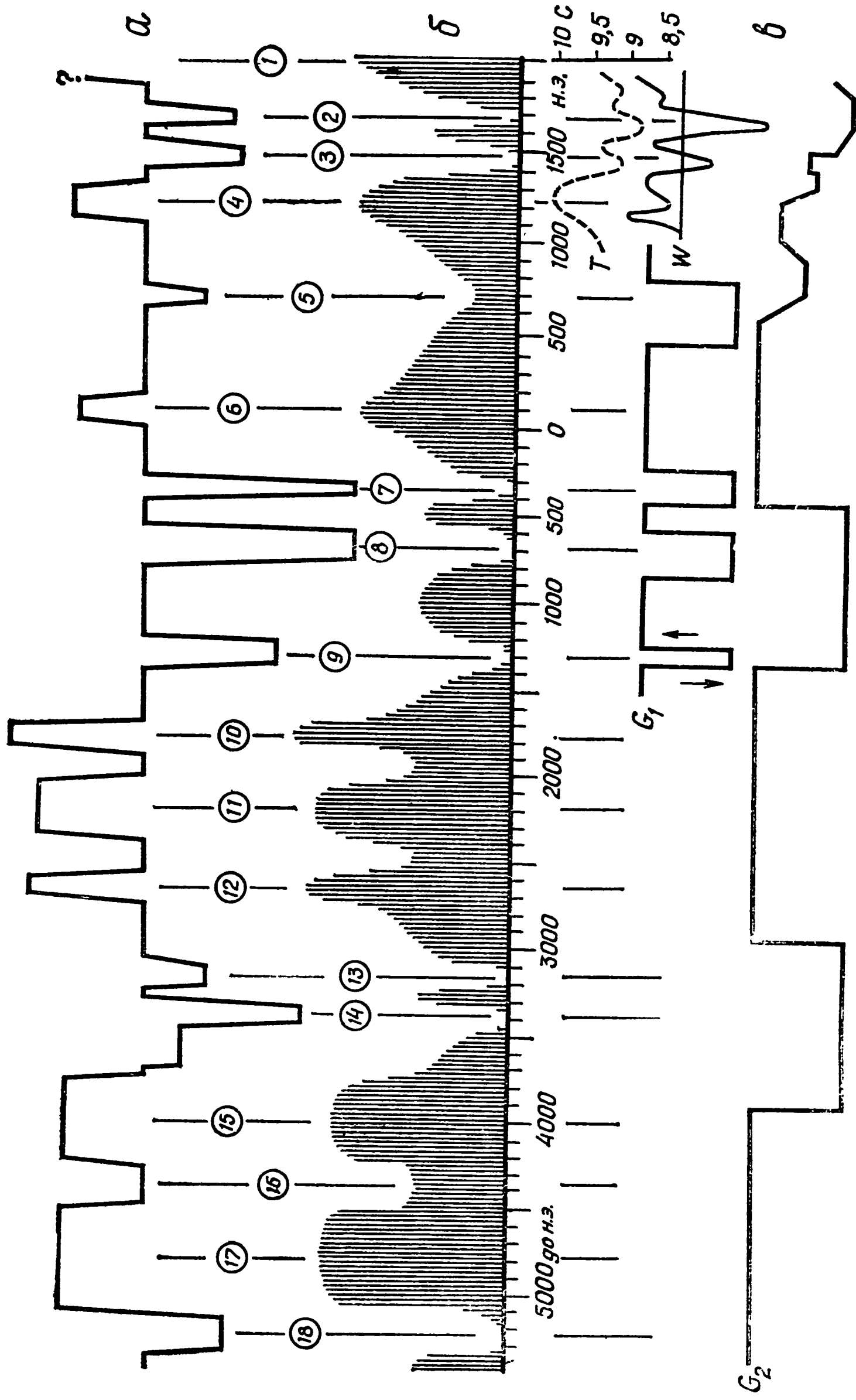
Одной из особенностей, сразу же выявляющейся при исследовании 7500-летнего периода, является эффект медленно меняющегося магнитного поля Земли, поведение которого за последние годы известно нам из исследований намагниченных горных пород. Когда плавное изменение, обусловленное этим, учтено, данные об углероде выявляют ряд других поразительных событий. Эти события могут ввести нас в заблуждение или оказаться ложными вследствие несовершенства данных, но могут быть и регистрацией изменений солнечной активности. С некоторой осторожностью будем предполагать, что они действительно обусловлены изменяющимся Солнцем.

Джон Эдди отождествил 18 случаев в прошлом, когда Солнце было или спокойнее, или более активно, чем обычно, и построил график, на котором показал изменения Солнца

вплоть до 5500 года до н. э. Наиболее заметная особенность этой кривой связана с тем, что в последнем столетии наблюдается подъем на гребень новой волны солнечной активности. По сравнению со значительно более длительным периодом в тысячи лет сегодняшней уровень солнечной активности, судя по числу солнечных пятен, протяженности короны, полярных сияний и вспышек, может быть необычно интенсивным. К тому же и в данных содержится смутный (не более!) намек на то, что существует цикл солнечной активности с периодом около 2500 лет.

Теперь зададим себе вопрос, связаны ли изменения солнечной активности, зафиксированные кольцами деревьев, с изменениями нашего климата? Если взять исторические данные, то обращает на себя внимание тот факт, что последние два минимума солнечной активности, имевшие место в XV и XVII столетиях, совпадают с периодами продолжительной чрезвычайно холодной погоды. Этот длительный период ужасной погоды часто называют Малым ледниковым периодом. Несомненно, этот период был исключительно холодным, согласно записям по меньшей мере за прошедшие 3000 лет и совпадал с удивительно спокойным Солнцем. В XVII веке Балтийское море зимой полностью замерзло. В течение многих лет европейские реки покрывались толстым льдом, и на льду Темзы в Лондоне устраивались празднества. Рост населения прекратился, как только холодные объятия зимы нанесли непоправимый урон сельскому хозяйству. Во время Малого ледникового периода среднегодовая температура в Англии (стране, для которой существуют наилучшие данные о температуре) была примерно на 1 градус Цельсия холоднее нормальной. Отметим, что удивительно малое изменение оказывает очень сильное воздействие, если оно продолжается непрерывно в течение десятилетий или столетий. В продолжение XV и XVII веков во всем северном полушарии Земли температура неизменно была ниже нормальной на 0,5—1 градус Цельсия.

Обратившись к периоду, более чем на несколько сотен лет предшествовавшему нашему, климатологи просмотрели записи о недавних флуктуациях протяженности ледников как в Европейских Альпах, так и во всем мире. При сопоставлении информации о продвижении льда с регистрацией солнечной активности по радиоуглероду было отмечено их хорошее соответствие друг другу. Найдено, что в те периоды, когда солнечная активность замедляет продвижение льда и когда Солнце слегка сердится (как это происходит в настоящее время), ледники отступают назад на горные склоны. Записи о поведении ледников также указывают на возможный



На этой диаграмме, построенной Джоном Эдди, показаны отклонения от среднего содержания радиоактивного углерода (кривая а). Кривая б отражает возможный механизм воздействия Солнца, порождающий изменения, отраженные кривой а. Кривая в состоит из четырех частей: G_1 показывает наступления и отступления альпийских ледников; G_2 — то же самое явление, но для всего земного шара; кривая T — средняя годовая температура в Англии (оценка по разным источникам); кривая W — степень суровости зим в Париже и Лондоне. (Заметьте, что на различных кривых отчетливо выявляются маундеровский минимум (2), минимум Шпёера (3) и малый минимум в эпоху средневековья (5).) (Дж. Эдди.)

2500-летний цикл в солнечной активности. Корреляция на первый взгляд поразительная, но требует для своего подтверждения дополнительных данных.

Столь осторожные исследователи, как Эдди, справедливо указали на то, что мы можем прийти к неправильному заключению. Если флуктуации климата каким-то образом регулируют количество находящегося повсюду в атмосфере углерода-14, корреляция какой-либо характеристики климата (как, например, протяженности ледников) с углеродом-14 обязательно будет наблюдаться независимо от того, какова причина этой корреляции. Именно поэтому столь и важны исторические свидетельства о Маундеровском минимуме, что мы не сомневаемся в том, что отсутствие пятен не зависит от холодного климата. Подобным же образом редкие данные из восточных источников оказывают дополнительную поддержку представлению о том, что солнечные изменения проявляются в данных об углероде и климатических флуктуациях.

Если мы примем тот факт, что климатические изменения на протяжении столетий и тысячелетий определяются Солнцем, проблемы интерпретации этих изменений все же останутся. Нам хотелось бы узнать, каким образом солнечная активность приводит к общему потеплению земного климата. Возможно, этот эффект передается посредством воздействия магнитного поля или же обусловлен возрастанием ультрафиолетового излучения от Солнца во время периодов солнечной активности. Самым простым механизмом из всех является изменение полного потока энергии с поверхности Солнца. Изменение полного потока примерно на 1 процент должно приводить к климатическим изменениям, подобным Малому ледниковому периоду. Изменение такого порядка не было бы замечено астрономами, если бы оно происходило постепенно, например в течение последней сотни лет. А падение температуры в центре Солнца позволило бы объяснить проблему нейтрино.

Таким образом, у нас есть свидетельства того, что в течение последних нескольких тысяч лет менялись и Солнце, и климат и что, по-видимому, между ними существует заметная связь. В течение уже длительного времени астрономы и метеорологи занимаются этой связью между 11-летним солнечным циклом и погодой.

Наше Солнце — наше будущее

Энергия непрерывно течет от горячего Солнца в холодную Вселенную с исключительно высокой интенсивностью. Энергия, испускаемая Солнцем, выражается в киловаттах числом $3,8 \cdot 10^{23}$ кВт; для сравнения заметим, что потребление энергии большинством домашних бытовых приборов составляет 0,3—3 кВт. Столь большие числа тяжелы для восприятия, пока они не переведены в более знакомые понятия. Участок солнечной поверхности размером с большую почтовую марку (5 кв. сантиметров) излучает около 30 кВт. Это значительно больше той энергии, что потребляется небольшим автомобилем. Еще один способ получить представление об излучаемой Солнцем энергии — совершенно справедливое утверждение о том, что за секунду Солнце испускает во Вселенную больше энергии, чем вся энергия, выработанная человеческой цивилизацией за время своего существования. Ясно, что Солнце — наиболее важный источник энергии для людей, если мы рассматриваем достаточно продолжительный период времени.

Настоящее состояние планеты Земля таково, что на ней господствующее положение заняли люди — существа, обладающие развитой технологией, под которой я имею в виду способность создавать машины, потребляющие энергию и материалы для того, чтобы повышать уровень жизни людей выше того уровня, который был бы преобладающим в «чистой» природе (т. е. в мире без машин). Хорошо известно, что средний жизненный уровень людей в различных частях мира зависит от количества энергии, доступной для данного общества. Здесь «доступный» означает «имеющий низкую стоимость по сравнению со стоимостью труда»; так, в сельской Индии, например, большинство различных видов энергии очень дороги, за исключением местного кизяка и дров; ни то, ни другое непригодно для двигателей машин. С другой стороны, в Канаде и США — самые высокие нормы потребления энергии на душу населения, и уровень жизни в этих странах достаточно высок, если мерить его чисто материальными показателями. Современный образ жизни очень сильно зависит от обильного снабжения дешевой энергией; это обеспечивает создание комфортных условий в жилищах,

которые мы обогреваем или охлаждаем; они могут быть просторными, если недорого земля, транспорт также дешев и производимые товары относительно недороги. Любопытно, что хотя для производства товаров необходимы и энергия, и сырье, для экономики обычно важнее наличие дешевой энергии в данном месте, чем поставки сырья. Великобритания, например, имеет обильные и разнообразные источники энергоснабжения, но очень мало основных видов сырья.

В своей книге «Десять ликов Вселенной» астрофизик и писатель-фантаст Фред Хойл сделал ряд интересных наблюдений о потреблении энергии людьми. Мы, например, потребляем в пятнадцать раз больше энергии немускульного происхождения (обогрев, топливо, машины), чем получаем непосредственно с пищей. Наличие технологии означает, что в среднем по земному шару люди имеют в своем распоряжении в пятнадцать раз больше энергии, чем существа, запасы энергии которых целиком определяются поглощенной ими пищей. Фактически отношение количества потребляемой энергии немускульного происхождения к количеству энергии, получаемой с пищей, является грубой мерой уровня технологии и той степени, с которой эксплуатируются ресурсы планеты. В качестве другого примера приведем следующий: в античную эпоху основным источником энергии для имущих классов был труд рабов, и отношение энергии немускульного происхождения к энергии мускульного труда было, вероятно, меньше единицы; эта небольшая величина в значительной степени объясняет различие в образах жизни, характерных для цивилизаций Древней Греции и Рима и сегодняшнего индустриального общества. Цивилизация, которая смогла бы достичь того, что потребляемая ею энергия немускульного происхождения была бы, скажем, в тысячу раз больше энергии, определяемой потребляемой ею пищей, была бы или чрезвычайно расточительной, или в значительно большей степени развитой, чем наша собственная.

В настоящее время высокоиндустриальные страны Северной Америки, Европы и Австралии все больше беспокоятся по поводу регулярно повторяющихся энергетических кризисов. Это беспокойство связано с сокращающимися запасами нефти, растущей стоимостью энергии и, как следствие этого, неспособностью правительств сдерживать инфляцию. С этим связано и чувство того, что ресурсы вообще истощаются и что мы вот-вот будем погребены под нашими собственными отбросами, задохнемся в загрязненной атмосфере или будем сожжены радиоактивными отходами. В значительной степени эти настроения обязаны своим происхождением политикам, журналистам и людям, отвечающим за рекламу и озабочен-

ным лишь такими весьма краткосрочными проблемами, как выборы в следующем году, завтрашние газеты или очередное возрастание цен. С точки зрения космической перспективы, если рассматривать проблему во всемирном масштабе и на большем интервале времени, в конечном счете не существует никакой действительной нехватки энергии; отсутствуют и какие-либо существенные соображения, согласно которым повторное использование естественных материалов и изобретение искусственных не позволили бы обеспечить достаточное количество материальных благ. Под словами «в конечном счете», «действительная» и «существенные» я имею в виду то, что в конце-то концов ресурсов планеты вполне хватит для всех, если они будут использоваться человечеством мудро и справедливо, что до известной степени предполагает соответствующий учет всех наличных ресурсов на Земле и действительных нужд большей части населения. Конечно, ключом к этой идеальной ситуации является правильная оценка той роли, которую должны играть солнечная, ядерная и получаемая за счет использования горючих ископаемых энергия в мире, планируемом в соответствии с научными принципами и с учетом прав всего человечества. По моему личному мнению, сформировавшемуся под влиянием выводов Хойла, человечество при его теперешней социальной организации по существу устроило бесстыдную свалку с целью захватить все доступные в настоящее время источники энергии (если не принимать во внимание в газетах рассуждений о дне Страшного Суда и условий, в которых мир будет существовать через какие-нибудь пятьдесят лет). По-видимому, кое-кто из экономистов стремится обесценивать будущее на 10 процентов ежегодно: с каждым галлоном топлива, сжигаемым сегодня, обращаются так, как если бы он обходился раз в 200 дешевле того галлона топлива, который предстоит сжечь через пятьдесят лет. Вот почему нефтедобытчики и качают нефть из Земли с такой скоростью, с какой только могут!

Наше энергопотребляющее общество почти полностью обеспечивается энергией за счет топлива из ископаемых останков растений и животных: нефти, угля, газа, хотя ядерные и гидроэлектрические источники энергии приобретают, конечно, все большее значение. Топливо, добываемое из Земли,— это первоначально запасенная в организмах солнечная энергия, которая накапливалась на протяжении сотен миллионов лет. Для образования залежей угля и месторождений нефти потребовалось полмиллиарда лет. Как известно, большая часть этого наследства была сожжена за столетие.

В настоящее время ископаемое топливо все еще представляет собой обильный источник энергии, доступной по исключительно умеренной цене и не требующей для своего производства больших усилий, по крайней мере по сравнению с другими альтернативными или заменяющими источниками энергии. Поскольку правительства западных стран чрезвычайно заинтересованы в поддержании потребительских цен на низком уровне (правда, в случае энергии — искусственно низком), пока еще не существует каких-либо сильных побуждений для переключения на источники энергии, не основывающиеся на ископаемом топливе.

На сколько времени хватит разведанных запасов угля и нефти? Теперешние запасы могли бы дать около 10^{23} джоулей (новейший 300-ваттный бытовой прибор, такой, например, как кухонный комбайн, потребляет 10^6 джоулей в час), которых достаточно для того, чтобы обеспечить снабжение энергией при теперешних темпах ее потребления до 2500 г. Эта экстраполяция предполагает, что никакого роста в ежегодных темпах потребления энергии не происходит, что определено не так в настоящее время.

Предположим теперь, что предприняты огромные усилия для того, чтобы сохранить топливо: посредством теплоизоляции домов, используя меньше автомобилей, за счет ликвидации отходов в промышленности и так далее. Даже при уменьшении темпов потребления наполовину запасов не может хватить далее чем до 3000 года. Следует помнить также, что некоторые типы месторождений (такие, например, как гудронированные пески, нефтеносные сланцы и бедные углем залежи) могут быть использованы только посредством затраты на стадии добычи значительной части содержащейся в месторождении энергии. Мы видим, что в течение будущего периода, сопоставимого с интервалом времени между Возрождением и теперешним днем, должна произойти существенная реорганизация энергоснабжения и спроса, так как в противном случае ископаемые виды топлива неминуемо будут исчерпаны.

Следовательно, мы приходим к выводу, что если общество с хорошо развитой технологией является желанной целью для всего человечества, совершенно необходимо получить доступ к другим источникам энергии значительно раньше того момента, когда будут выработаны запасы ископаемого топлива. Меры, принимаемые с целью экономии запасов топлива, не избавляют нас в конечном счете от необходимости радикальной замены источников энергоснабжения. Они представляют собой разумный способ выиграть время, даже если и позволят лишь отсрочить дату, при которой это станет неизбежным.

С переключением на источники ядерной энергии проблемы снабжения и резервов по существу станут тривиальными. Запасы тория и урана, используемые в качестве топлива в обычных ядерных реакторах, огромны, возможно в миллион раз больше запасов ископаемого топлива. К тому же имеются фантастические запасы тяжелого изотопа водорода — дейтерия — в океанах. Его достаточно для того, чтобы общество, интенсивно расходующее энергию, функционировало на протяжении многих миллионов лет. Существующая проблема здесь — это проблема технологии.

Солнце легко превращает водород в гелий, но на Земле это пока достигнуто лишь в экспериментах, довольно ограниченных по своим масштабам. Еще ни один эксперимент по синтезу водорода не дал энергии больше, чем та, которая была введена в установку. Удерживать дейтериевую плазму при очень высокой температуре в течение времени, достаточного для того, чтобы начался синтез, до сих пор не удается. Сосуд из любого материала для этого не годится. Много остроумных методов было предложено для удержания горячей плазмы магнитными полями. И хотя правительства многих стран тратят значительные средства на исследования плазмы, термоядерный реактор, который оправдал бы отпущенные на него средства, еще не построен. Тем не менее «Солнце в лаборатории» становится все ближе. Обнадеживающими оказались эксперименты, в которых при помощи мощных лазеров взрывали капельки обогащенной дейтерием воды. Время удержания плазмы все время растет. Возможно, экспериментального реактора, в котором осуществляется синтез ядер, осталось ждать не так уж долго.

Большинство людей испытывают подлинный страх перед ядерной войной. Однако репутация ядерных реакторов на протяжении всей их истории была хорошей. Наиболее серьезная до настоящего момента авария, которая произошла в 1979 году на атомной станции «Три Майл Айленд», была ликвидирована раньше, чем авария приобрела катастрофический характер. Реактор был разрушен за пятнадцать минут, и вся установка получила серьезные повреждения. Случайные аварии такого типа могут служить серьезным уроком для операторов, требуя от них постоянной бдительности и осторожности. В энергетических ядерных установках достигнута достаточно высокая степень безопасности, близкая к теоретически возможной. Аварии более вероятны скорее в результате последовательности человеческих ошибок, чем пороков конструкции. Это также должно учитываться и учитывается на стадии проектирования новых установок.

Я думаю, будет разумно составить предварительное суждение о ядерных установках на основе данных, накопленных к настоящему времени. Ядерная энергия является теперь существенным источником электроэнергии в Европе и США, хотя пока этот источник поставляет лишь небольшую долю всей потребляемой энергии. Ядерная энергетика обеспечивает эти страны энергией в течение ряда лет без каких-либо катастрофических взрывов, драматического, возросшего числа смертей среди операторов установок и без того, чтобы местное население подвергалось уровням облучения, которое заведомо вредно. В настоящее время работает уже достаточно атомных электростанций для того, чтобы какая-либо случайная внушающая страх история достигла газет и телевидения, как серьезная авария на «Три Майл Айленд», упоминавшаяся выше. Были и смертельные случаи облучения, но их было очень мало, и они происходили лишь с людьми, непосредственно работавшими на станциях. Аргументы против атомных электростанций необходимо выслушать и рассмотреть, но они, по-видимому, не могут сыграть роль неотразимого аргумента, если принять во внимание сильно ограниченную потенциальную энергию ископаемого топлива. Проблема ядерных отходов — это проблема, на которую промышленность не должна закрывать глаза. Технология, намного опередившая нашу собственную с точки зрения использования энергии, должна была бы иметь усовершенствованные, надежные методы обращения с радиоактивными кучами отходов. На современном уровне производства отходов нельзя не учитывать огромные возможности океанов по поглощению и рассеиванию опасных и ядовитых веществ, так как они в целом уже обладают значительно большей радиоактивностью, чем та, которую добавляют отходы ядерных станций.

Мне кажется, что антиядерное «лобби» часто не учитывает ту дорогую цену в виде человеческих страданий и смерти, которую приходится платить за добычу обычных видов топлива: шахтеры, заваленные в шахтах, погибшие или преждевременно вышедшие на пенсию из-за легочных заболеваний; водолазы, погибшие во время аварий на нефтеочистительных заводах, взрывов танкеров с топливом на море и на дорогах. По всему миру погребальный колокол должен звонить о тысячах погибающих ежегодно. Добавим к этому загрязнение атмосферы и смерти, которые это загрязнение должно вызывать, особенно среди тех людей, жизнь которых уже находится под угрозой из-за заболеваний дыхательных путей. Репутация ископаемого топлива оказывается не такой уж чистой, не так ли?

В споре об атомных электростанциях теоретически наихудший случай аварии на станции приравнивается без учета факторов риска к авариям, связанным с добычей ископаемых видов топлива, которые общество вежливо признает. Риск очень мал (но все еще не равен нулю) для аварий на атомных электростанциях и велик для рабочих, занятых добычей и очисткой горючих ископаемых. Вопрос в действительности сводится к следующему: хотим ли мы, чтобы наше технологическое общество продолжало существовать — в этом случае программы строительства атомных электростанций должны быть ускорены, а людям придется смириться с риском,— или же общество должно перейти к такому образу жизни, при котором потребляется энергии значительно меньше,— со значительным уменьшением материальных благ и ухудшением медицинского обслуживания, следовательно, и с более низким уровнем жизни и выживаемости? Думается, что большинство людей, припертые к стенке, скорее предпочтут смириться с ядерной станцией, чем жить в эксцентричной деревенской бедности.

Несомненно, к любой ядерной программе желательно приступать очень осторожно; к счастью, существует способ отсрочить тяжелые решения и, возможно, справиться с проблемой при минимальной зависимости от ядерной энергии. Время может быть выиграно за счет значительно более разумного использования энергии, текущей бесплатно от Солнца. Когда Солнце находится прямо над головой, каждый квадратный метр поверхности Земли получает более киловатта энергии. Это количество оказывается несколько меньшим для реального случая, когда Солнце освещает поверхность Земли под углом, но тем не менее оно порядка 1 кВт на 1 кв. метр. Площадь крыши даже небольшого дома в течение одного солнечного дня получает около 1000 кВт-час солнечной энергии. Для моего собственного дома три солнечных дня в течение летних месяцев дадут больше энергии, чем необходимо для покрытия всего нашего годового расхода электроэнергии на освещение и бытовые надобности. В течение следующих десяти дней солнечного неба крыша поглотит столько же энергии, сколько водонагреватель потребляет за весь зимний отопительный сезон. Итак, мы видим, что возможная роль солнечной энергии в качестве заменителя кое-каких из существующих источников очень важна уже сейчас.

Необходимо различать два способа использования солнечной энергии. Во-первых, это схемы, в которых используется нагрев Солнцем; во-вторых, генерация электричества непосредственно за счет солнечного света. Основные принципы

солнечного нагрева достаточно просты: поглотить и сохранить тепло Солнца, когда Солнце светит, а затем использовать его для нагрева. Существует много способов реализации этого принципа. Чтобы изложить их все, потребовалось бы написать еще одну книгу, так что я просто упомяну некоторые из них.

В самом доме расход энергии на нагрев используемой в домашнем хозяйстве горячей воды может быть уменьшен, если вода, поступающая в основной резервуар, предварительно нагрета, так что газ или электричество потребуются лишь для дополнительного нагрева. Удобный путь для предварительного нагрева — непрерывная принудительная циркуляция воды через помещенную на крыше черную панель радиатора, откуда вода затем поступает в накопительный расширитель в верхней части отопительной системы. В Англии простая система, вроде этой, обеспечит вас летом почти бесплатно достаточным количеством горячей воды. Конечно, для того чтобы предотвратить перегрев всей системы в особенно жаркий день, необходимы электронные контрольные устройства. В течение остальной части года, за исключением, возможно, середины зимы, будет генерироваться некоторое количество полезного тепла.

В настоящее время нагревать весь дом одним лишь Солнцем очень дорого, поскольку дома, использующие солнечную энергию, пока еще являются экспериментальными. Дорогие экспериментальные схемы не выдерживают пока конкуренции с более дешевой энергией. Эта ситуация будет постепенно меняться, когда стоимость ископаемых видов топлива будет расти. Обнадеживающим признаком в Европе и Северной Америке является гораздо большее понимание архитекторами, проектировщиками и теми, кто эксплуатирует здания, выгоды толстой тепловой изоляции и тщательного выбора местоположения окон, чтобы они не мешали проникать в здание солнечным лучам зимой. Дом, в котором основные жилые комнаты смотрят на юг, будет дешевле обогревать зимой, чем тот, окна которых смотрят на север. В жарком климате, скажем на юге США или на севере Австралии, справедливы противоположные соображения: окна необходимо помещать на северную сторону в США и южную сторону в Австралии, чтобы уменьшить стоимость охлаждения летом. Во многих странах уже построены экспериментальные дома для оценки того, чего можно достичь на практике. В данный момент такой дом, вероятно, стоит в два или три раза дороже обычного дома. Если разница в стоимости снизится до 10 или 20 % сверх обычной стоимости, то такие дома будут хорошей покупкой. Большие возможности

заложены и в более разумном понимании воздействия Солнца на здания. Например, окрашенные стекла теперь являются стандартными в больших конторских зданиях отчасти потому, что они уменьшают стоимость охлаждения в солнечную погоду. Солнечный нагрев применяют также и при организации досуга. Плавательные бассейны на открытом воздухе можно покрывать касающейся воды полимерной пленкой, что уменьшает испарение, основную причину охлаждения, и, следовательно, повышает температуру бассейна.

До сих пор я рассматривал некоторые возможности использования солнечной энергии в домашнем хозяйстве. Большое значение будет иметь получение электричества из солнечной энергии в пустынях, где постоянная солнечная погода является нормой. Если удастся добиться, чтобы процесс получения электроэнергии был достаточно дешев, это упростит решение основной проблемы, связанной с использованием солнечной энергии: вам не нужно много энергии в пустынях, где живет мало людей; в то же время большое количество энергии необходимо в больших городах, расположенных в облачных умеренных зонах (Нью-Йорк, Лондон, Москва); эта энергия легче всего может быть получена в виде электроэнергии, генерированной в пустынях. Например, полную потребность в энергии США можно удовлетворить с помощью собирающих солнечное излучение зеркал — коллекторов, покрывающих одну десятую часть штата Аризона и имеющих коэффициент полезного действия, равный лишь 10 процентам. В Нью-Мексико большая экспериментальная установка уже генерирует энергию, концентрируя солнечные лучи на специальный котел. Пар высокого давления, образующийся в этом котле, может быть использован для приведения в действие генератора точно таким же способом, как и на электростанциях, работающих на обычном ископаемом топливе.

В Альбукерке (Нью-Мексико) в лаборатории фирмы «Сандиа» построена экспериментальная установка для испытаний устройств, предназначенных для получения электричества из солнечной энергии. Коллектор собирает на приемник 5 мегаватт солнечной тепловой энергии. Вещество, переносящее энергию (скажем, вода), циркулирует в приемнике, где при температуре, равной почти 1000°C , превращается в пар высокого давления, который может быть использован для приведения в действие генератора паровой турбины. В Барстоу (Калифорния) должна быть построена установка, дающая 10 мегаватт. Возможно, это лишь первая из нескольких таких установок.



Панель приемника солнечной энергии проходит проверку на испытательной станции фирмы «Санди лабораториз». Панель находится на вершине 60-метровой башни. Солнечная энергия концентрируется стеклянными зеркалами, которые постоянно направлены на Солнце. 222 зеркала способны направить на приемную панель до 5 МВт солнечной энергии. («Санди лабораториз», США.)

Никакое зеркало-коллектор на Земле не сможет поставлять солнечную энергию ночью. Чтобы обойти эту трудность, существуют честолюбивые проекты, предлагающие построить огромные солнечные зеркала-коллекторы, которые двигались бы в космическом пространстве по орбите вокруг Земли. Они, вероятно, должны передавать энергию на Землю в виде

микроволн. Наземные станции будут настраиваться на это мощное электромагнитное излучение и превращать его в обычный ток. Предварительные исследования показывают, что такие электростанции на орбите Земли не столь уж недопустимо дороги по сравнению со стоимостью той энергии, которую они дадут. Конструкция должна включать в себя технику, уже испытанную в космосе во время экспериментов значительно меньшего масштаба.

Что касается солнечных энергетических станций в космосе, следует упомянуть, что они в принципе могут стать обильным источником энергоснабжения. Но чтобы этого достичь, требуются огромные капиталовложения и использование передовой технологии. Это иллюстрирует то общее положение, согласно которому прогрессивная технология обеспечивает лучшее снабжение энергией, так как при этом изобретается и применяется новая техника. Нет никакой нехватки энергии как таковой, есть лишь нехватка определенных видов энергии. В более длительной перспективе было бы безрассудством, если бы легкодоступные ископаемые виды топлива иссякли до такой степени, что технология, необходимая для строительства ядерных электростанций или космических станций, просто не могла бы быть обеспечена страдающей от недостатка энергии экономикой. Результатом такой глупости была бы катастрофическая и необратимая гибель человечества. По этой причине источники энергии, нуждающиеся в прогрессивной технологии, должны быть введены в действие или широко распространены как можно скорее, прежде чем будет слишком поздно.

Мы все более осознаем теперь, насколько наше сегодняшнее сложное общество зависит от источников энергоснабжения. Мы также знаем, что эти запасы энергии не бесконечны и что в ближайшем будущем они могут стать предметом политического вмешательства. В течение интервала времени значительно более короткого, чем период зарегистрированной истории человечества, должны произойти существенные изменения. Человек должен или научиться обходиться без энергии, и таким образом вернуться к полуживотному состоянию, или научиться покорять два фактически неограниченных источника энергоснабжения: внутриядерную энергию и энергию дневной звезды — нашего Солнца.

Литература

1. *Abetti G.* The Sun. Faber and Faber, 1957.
2. *Aveni A. F.* Archaeoastronomy in Pre-Columbian America. University of Texas Press, 1975.
3. *Baxter W. M.* The Sun and the Amateur Astronomer. David and Charles, 1973.
4. *Bruzek A., Durrant C. J.* Illustrated Glossary for Solar and Solar-Terrestrial Physics. D. Reidel, 1977. (Русский перевод: Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов: Пер. с англ./Под ред. А. Бруцека, Ш. Дюрана. — М.: Мир, 1980.)
5. *Eddy J. A.* The New Solar Physics. Westview, 1978.
6. *Eddy J. A.* A New Sun: The Solar Results from Skylab. NASA, 1979.
7. *Gribbin J.* Climatic Change. Cambridge University Press, 1978.
8. *Kenward M.* Potential Energy. Cambridge University Press, 1976.
9. *Hoyle F.* On Stonehenge. W. H. Freeman, 1977.
10. *Hoyle F.* Ten Faces of the Universe. Heinemann, 1977.
11. *McDaniels D. K.* The Sun: Our Future Energy Source. John Wiley, 1979.
12. *Mitton S.* The Crab Nebula. Faber and Faber, 1979.
13. *Mitton S.* The Cambridge Encyclopaedia of Astronomy. Jonathan Cape, 1978.
14. *Moffatt H. K.* Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids. Cambridge University Press, 1978. (Русский перевод: Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде: Пер. с англ. — М.: Мир, 1981.)
15. *Muirden J.* Astronomy with Binoculars. Faber and Faber, 1976.
16. *Rackham T.* Astronomical Photography at the Telescope. Faber and Faber, 1972.

Указатель

- Аквинский Фома* 125
Активная область 134, 135—136
Анаксагор 29
Англо-Австралийский телескоп 166
«Аполлон», экспедиции на Луну 163—164
Аристарх Самосский 29—30
Аристотель 30, 39, 42, 125
Арочное волокно 137
Аткинсон Р. 75
Атомная электростанция 192—193
 Три Мейл Айленд 193
 удаление отходов 193
 факторы риска 192—194
- Белый карлик* 104
Бёте Г. 76
Бирман Л. 158
Браге Тихо 31
Бунзен Р. 112
Бэбкок Г. В. и Бэбкок Г. Д. 56, 133
- Вавилонская астрономия* 22—23
Вавилонская башня 22
Вайцзекер 76
Ван Аллен Дж. А. 179
 пояса частиц *Ван Аллена* 179—180
Вассениус Б. 144
«Вела» — спутник 164
Взрыв сверхновой 103, 105—106, 115
Вилд П. 153
Вилсон А. 126
 эффект *Вилсона* 127
Вирт С. Р. 137—138
Воластон В. 50, 112
- Волокно* 148
Волоконца или фибриллы 122, 125
Вольф Р. 130—131
 изменения числа солнечных пятен 131—132
 число солнечных пятен 131—132
Вселенная, возраст Вселенной 94
- Галактика*
 возраст 94
 Млечный Путь 11
 спиральные рукава 98
 строение 98
Галилео Галилей 42, 125, 130, 140, 141
Гамма-лучи
 аннигиляция электрон-позитронных пар 152
 гамма-астрономия 116, 152
 образование гамма-лучей 152
Гамов Г. 75—76
Гелий
 содержание гелия
 в космическом пространстве 164
 на Солнце 164
 открытие гелия 113
 термоядерный синтез гелия 76—79
Гельмгольц Г. 74, 78
Генерация энергии в звездах и Солнце
 генерация энергии в термоядерных реакциях 76—81
 переход массы в энергию 78
 радиоактивность и генерация энергии 74—75
 ранние теории 74
Геомагнитная буря 177

- Геомагнитный хвост 178
Герцшпрунга — Рессела диаграмма 101
Гершель В. 50, 126
Гиппарх 46
 Грануляция 83, 170
 супергранула 122, 125, 148, 170
- Деландр А.* 54
Джилл Д. 34—36
Джинс Дж. 74, 96, 98
 критерий коллапса 96, 98
 Диаграмма бабочек 132—133
Дикке Б. 108
 Дифракция 50—53
 Доколумбовская астрономия см. Мезоамериканская астрономия
 Доплеровское смещение в спектральных линиях 116—117
 Древнегреческая астрономия 28—30
 Древнеегипетская астрономия 20—22
 Амон-Ра 21
 Карнак 21
 космология 20—21
 пирамиды 11, 21—22
 Ра 21
 Дрезденский кодекс 24
Дэвис Р. 90
 эксперимент по обнаружению нейтрино 90—92
- Затмение 15—18, 56—57
 лунное 17—18
 предсказание затмений 17—18
 солнечное 17—18, 56—57, 144
- Звезды
 баланс давления в звездах 72—73
 образование 95—98
 строение 88
 устойчивость 75
 эволюция 88—92, 93—110
- Зееман П.* 56
 эффект Зеемана 56, 122
 Земля 94, 104, 173—187
 и космическое излучение 26
 и солнечная энергия 188
 и солнечные вспышки 150
 распространение радиоволн 175
 Зодиакальный свет 70, 166
- Игла Клеопатры* 22
 Интерферометр 59
 Ископаемые виды топлива 190—191
 Исследования Солнца, природа Солнца 11
- Карнак 21—22
 Калгурский радиогелиограф 40, 61, 153
Камерон А. 93
Кассини Дж. Д. 140—141
Кельвин (В. Томсон) 74, 78
Кеплер И. 30, 88
Кирхгоф Г. 112
Кларк Д. 142
 Климатические изменения 182—187
 Кометы 158, 167—168
 Конвекция 83
 конвективная зона 83
 Конвективные ячейки 83
Коперник 30—31
 Корона 56, 68—69, 84—87, 129, 134, 139, 144, 146, 148, 149, 158, 168—169
 корональный дождь 146
 корональные дыры 168, 170—171
 корональные облака 146
 корональные протуберанцы 146
 Корonoграф 57—58, 61
 Космические лучи 174
 Космохронология 95
Кортес 24
Кэррингтон Р. 133
Кук Джеймс, капитан 32

- Ледниковые периоды** 37, 93, 182—183, 185—187
Лио Б. 57—59
Локьер Дж. Н. 113
Луна
 возраст 74, 94—95
 движение 16—18
- Магнитное поле** 122—125, 130—157
 активная/область 134, 135—137
 динамо-эффект 123, 136—137, 140, 154
 корональная дыра 170
 магнитное поле Земли 123, 176—179
 магнитограммы с высоким разрешением 125
 солнечная вспышка 151, 154—156
 солнечное пятно 125, 154
- Магнитограф** 56, 122
Магнитопауза 177—178
Магнитослой 178
Магнитосфера
 Земли 69, 177—178
 Юпитера 179
Магнитохвост 179
Магнитуда 46—47
Майер Дж. Р. 74
Макмасовский солнечный телескоп 47
Малый ледниковый период 185—187
 «Маринер-2» 160, 164
Маундер Е. У. 132—133, 140, 141
 диаграмма бабочек *Маундера* 132—133
 маундеровский минимум 141, 143, 183, 186—187
Мегалитическая астрономия 13—20, 40. *См. также* Стоунхендж
Межзвездная среда 95—98, 104—105, 106—107, 115
Межпланетная среда 69—70, 167—168
- Межпланетное магнитное поле** 124, 161—162, 164—165, 177
Мезоамериканская астрономия 23—25
Мензел Д. Г. 76
Метеориты 94—95, 100
Метонический цикл 23
Модель атмосферы 115
Моделирование математическое 65—66, 87, 94, 109—110
Молекулы в межзвездной среде 98
Мур П. 44
- Нейтрино**
 нейтринная астрономия 89—93
 нейтринный телескоп 90—91
 образование 77—79
 открытие 89
 поток 92—93
 солнечное нейтрино 89—93
 температура в центре Солнца 93
- Непрозрачность солнечного вещества** 80
Нью-Гранж, Ирландия 20
Ньютон И. 31, 112
 закон тяготения 34, 88
 спектроскопия 40, 112
- Относительность**
 общая теория относительности 35—36, 76
 проверка теории относительности 35—36, 88, 108—109
- Орбитальная солнечная обсерватория** 61—62, 116, 168
- Паркер Е. Н.* 156, 157, 158
Паули В. 89
Перенос энергии на Солнце 81—86
 в солнечном ядре 81—82
 в солнечной оболочке 82—83
Пирамиды 11, 21—22

- Планеты 28
Платон 28
Полутень 125, 128
Поляризованный свет 54—56, 122
Полярное сияние 39, 150, 180—182
Полярные щетки 168
Понтекорво Б. 90—91
Потемнение к краю 64
Потребление энергии и уровень жизни 188—189, 191—192
Пора 128
Проксима Центавра 27
Противосияние (gegenschein) 167
Протонно-протонный цикл 76—81
 и образование нейтрино 91—92
 лабораторная термоядерная реакция 79
Протосолнце 98—100, 115
Протуберанец 130, 134, 144—149
 активный 146
 корональное облако 146
 определение 146
 петельный 146—147
 сердж (сплошной выброс) 146
 мини-сердж, мини-выброс 148
 спокойный 146, 148
 спрэй (выброс типа струи) 146
 фотоснимок протуберанца 148—149
 эруптивный 146
Профиль (контур линии 114
 искажение контура за счет доплеровского смещения 116—117
Прохождение Венеры по диску Солнца 32
Пуле К. С. 45
Пульсары, открытие пульсаров 69
Пятиминутные колебания 118
- Ра** 21—22
Радарная астрономия 33
Радиоуглерод
 датирование по радиоуглероду 184—185
 климатические изменения 185
 образование радиоуглерода 188
- Радуга 50
Рентгеновская астрономия 61—63, 68, 149, 151, 169
Роуланд Г. 114
- Секки А.* 168
«Скайлэб, наблюдения на «Скайлэбе» 62—63, 122, 124, 134, 138, 147, 150, 165, 168, 169, 171, 172
- Солнечная активность
 магнитное происхождение 136—137
 основные проявления 130—157
 солнечный ветер и солнечная активность 164—165. *См. также* Солнечные вспышки, солнечные пятна, солнечный цикл 140—144
- Солнечная атмосфера 111—129
 колебания в солнечной атмосфере 118
 обращающий слой 112
 поглощение в солнечной атмосфере 111—113
 химический состав 113—114, 115—116
- Солнечная вспышка 149—157, 174—175
 выделение энергии 151
 и радиовсплески 152—153
 и солнечный ветер 165
 магнитное поле 151, 154
 полярное сияние 150
 типы радиовсплесков 152—153
- Солнечная поверхность 109—129. *См. также* Фотосфера, солнечные пятна
 и вращение Солнца 117—118
- Солнечная постоянная 44. *См. также* Солнечный параметр
- Солнечная спектроскопия 50—55
 Ньютона 50
 Фраунгофера 50—53
 Воластона 50

Солнечная энергия

измерения потока 44—47

поток 188

проекты использования солнечной энергии 195—198

Солнечно-земные связи, воздействие Солнца на Землю 173—187

и магнитное поле 175—179

на атмосферу 173

на ионосферу 173—174

на распространение радиоволн 175

полярные сияния 180—181

Солнечное излучение, интенсивность солнечного излучения у Земли 45

Солнечное магнитное поле 56—58

Солнечное ядро 66

Солнечные наблюдения

любительские 42

метод проекции 42

профессиональные 28, 35—36, 38—39, 40—63

с помощью фильтров 43—44

Солнечные пятна 125—129, 130—157, 182—184

диаграмма бабочек 132—133

исторические записи, хроники 125—126, 140—141, 142, 143, 183

магнитные поля 125, 154

миграция 132—133

наблюдения 42

обожествление Солнца 11, 21—22, 23, 25

полутень 125, 128

происхождение 128, 137

солнечное вращение и пятна 117—118, 128

структура 138

температура 138

тень 127, 128

число солнечных пятен Вольфа 131—132

эффект Вилсона 127

Солнечные телескопы *см.* Телескопы

Солнечный ветер 68—69, 158

взаимодействие солнечного ветра с Землей 177—178

динамика солнечного ветра 161

кометные хвосты и солнечный ветер 158

корональные дыры как источник солнечного ветра 168

магнитное поле и солнечный ветер 161—162

магнитосфера и солнечный ветер 177—178

открытие солнечного ветра 158—161

радиоволны, их взаимодействие с солнечным ветром 160—161

скорость солнечного ветра 161

состав солнечного ветра 163—164, 168

торможение вращения Солнца 163. *См.* также Межпланетное магнитное поле; солнечно-земные связи

Солнечный параметр 44

Солнечный цикл

и маундеровский минимум 141, 143, 183, 186—187

и минимум *Шпёнера* 143

и малый средневековой минимум 143

Солнце

астрофизическая лаборатория 35—37

атмосфера Солнца 54, 56, 67—68

баланс давления внутри Солнца 72—74

белый карлик 104

взрыв новой 103

внутренние источники энергии Солнца 76, 101. *См.* также

Протонно-протонный цикл

возраст Солнца 74, 94, 163

вращение Солнца 98, 117, 128, 135—136, 140, 153, 163, 177

гравитационное сжатие Солнца 72
давление в центре Солнца 66
и взрыв сверхновой 103, 105—106
климатические изменения, обусловленные Солнцем 182—187
колебания Солнца 108
красный гигант 102—103
магнитное поле Солнца 98, 122—129, 135—138, 156—157. *См. также* магнитное поле, солнечные пятна
масса Солнца 34
место Солнца на главной последовательности 101
модели Солнца 65—66
образование Солнца 95, 98. *См. также* межзвездная среда, критерий Джинса, протосолнце
перемешивание слоев Солнца 93. *См. также* Нейтринная астрономия
перенос энергии 81—83
положение Солнца в Галактике 11, 12
протосолнце 98—100
радиоизлучение Солнца 59—60, 153, 155, 175
размеры Солнца 33, 34
расстояние от Земли, измерения *Браге* 31
Джилла Д. 32—33
Коперника Н. 30
Кеплера И. 31
Ньютона И. 31—32
оценки греков 28—32
параллакс Марса 32
прохождение Венеры по диску Солнца 32. *См. также* Радарная астрономия
свойства Солнца 33—35
сила притяжения на поверхности Солнца 34—35
солнечное ядро 66, 101, 104—105

строение Солнца 64—71, 88
температура
внутри Солнца 37, 66—67
короны 68
на поверхности 37, 68, 111
хромосферы 68
температура в центре Солнца 66—67, 92, 93
тип звезды 71
устойчивость Солнца 74—75, 80—81
химический состав 113—114
черный карлик 104
эволюция Солнца 94—110
Спектроболометр 45
Спектрогелиограмма 54—55
Спектрогелиоскоп 54—55
Спектроскопия 112—115, 118—119
Спикула 122, 125, 148
макроспикула 122
«Старфиш», атомный взрыв в верхней атмосфере 180
Стефенсон Р. 142
Стоунхендж 13—20
затмения 15—18, 23
календарь 15
лучи зрения, визирные линии 20
солнечная обсерватория 15—20
структура, строение 13—20
Сцинтилляции (мерцания) в межпланетной среде 68, 160
Телескопы солнечные
аэростатные 83
Калгурский 40, 59
Макмасовский 47
Маунт-Вилсоновский 49
обсерватория Биг Бэр 49
радиотелескопы 59—60
спутниковые 61—62. *См. также* Скайлэб
Тень пятна 125, 127
Теотиуакан 24
Теплопроводность 81

- Термоядерный реактор 80
 Технеций в звездах 116
 Три Мейл Айленд 193
 Тяжелые элементы, их происхождение 106, 115

 Углеродно-азотный цикл 104
 Ультрафиолетовое излучение 27, 38, 44, 60, 82
 Уярчение к краю 64

 Факелы 128—129, 134
 Ферраро В. 158
 Физические законы 28, 31—32, 73
 Фильтр солнечный
 интерференционно-поляризационный фильтр 44, 53, 120, 128
 применение фильтров 44, 58
 Флемстид Дж. 141
 Флоккулярная область, активная область 134, 137, 148
 Фотосфера 67—68, 83, 111—129
 Фраунгофер И. 50, 112
 Фраунгоферовы линии 54, 112—114

 Хейердал Т. 25
 Хейл Дж. Э. 54, 55, 133
 Хилл Г. 108—109, 118
 Хойл Ф. 17, 189
 Хокинс Дж. 15, 17
 Хромосфера 68, 83—84, 120, 134, 151, 171
 Хромосферная сетка 120

 Чепмен С. 158
 Чичен Итца 24—25

 Шайнер К. 125, 140
 Швабе Г. 130, 140
 Шлемовидные лучи 168—169
 Шпёер Г. 133, 140, 143

 Эвклид 28
 Эдди Дж. 140, 141, 143, 184, 187
 Эзер Д. 93
 Эйнштейн А. 35, 36
 общая теория относительности 35—36, 76
 «Эксплорер-1» 179
 «Эксплорер-10» 160
 Эльзассер У. М. 150
 Энергетическая политика 37, 188—198

 Ядерные реакции 76—87
 возникновение ядерных реакций в протозвездах 93—199. См. также Углеродно-азотный цикл, протонно-протонный цикл
 Ядерный реактор 197
 Янсактун 24
 Янг К. А. 168

Оглавление

Предисловие к русскому изданию	5
Предупреждение!	16
Введение	9
Глава 1. Древнее Солнце	11
Глава 2. Наша ближайшая звезда	27
Глава 3. Солнечные инструменты	48
Глава 4. Архитектура Солнца	52
Глава 5. Тигель алхимика	80
Глава 6. Загадка солнечных нейтрино	88
Глава 7. Эволюция нашего Солнца	94
Глава 8. Поверхность и атмосфера	111
Глава 9. Активность и солнечный цикл	130
Глава 10. В космос	158
Глава 11. Солнце и Земля	173
Глава 12. Наше Солнце — наше будущее	188
Литература	199
Указатель	200

УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и другие просим присылать по адресу: Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

Саймон Миттон

ДНЕВНАЯ ЗВЕЗДА

Научный редактор Э. А. Медушевская
Мл. научный редактор И. А. Гревцова
Художник В. П. Груздев
Художественный редактор М. Н. Кузьмина
Технический редактор Н. И. Манохина
Корректор Т. И. Стифеева

ИБ № 3274

Сдано в набор 14.11.83. Подписано к печати 18.04.84.
Формат 60×90¹/₁₆. Объем 6,50 б. л. Бумага типограф-
ская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 13,00. Усл. кр.-отт. 13,39. Уч.-изд. л. 12,31.
Изд. № 27/3274. Тираж 20 000 экз. Зак. 859. Цена 65 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» 129820, Москва, И-110, ГСП,
1-й Рижский пер., 2.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие
ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского
объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ!

В этой книге рассказывается о Солнце. Ни при каких обстоятельствах никто не должен пытаться смотреть прямо на Солнце, даже через светофильтры или закопченные стекла. Солнце — мощный источник инфракрасного и ультрафиолетового излучения; если оно окажется сконцентрированным на сетчатке глаза, это может привести к непоправимым последствиям для зрения.

В гл. 3 описан безопасный метод наблюдений Солнца путем проектирования его изображения на экран из белого картона.

С.Миттон

Дневная звезда

Москва „Мир“

